

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

Campus DIVINÓPOLIS

GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

Brenda Caroline Saldanha Cedro

INVESTIGAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE MELHORIAS EM UMA
IMPRESSORA 3D SLA/DLP

Divinópolis, 2019

Brenda Caroline Saldanha Cedro

INVESTIGAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE MELHORIAS EM UMA
IMPRESSORA 3D SLA/DLP

Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para aprovação na disciplina de TCC II.

Áreas de integração: Mecânica e Computação.

Orientadora: Prof^a. Ma. Amanda Fernandes Vilaça Martins.

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Cláudio Oliveira.

Divinópolis, 2019

Brenda Caroline Saldanha Cedro

INVESTIGAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE MELHORIAS EM UMA
IMPRESSORA 3D SLA/DLP

Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para aprovação na disciplina de TCC II.
Áreas de integração: Mecânica e Computação.

Comissão Avaliadora:

Prof^a. Ma. Amanda Fernandes Vilaça Martins
CEFET *Campus V*

Prof^a. Ma. Ludmila Rodrigues Milagre
CEFET *Campus V*

Prof. Dr. Marlon Antônio Pinheiro
CEFET *Campus V*

Divinópolis, 2019

Dedico este trabalho aos meus pais, Antônio Lúcio e Imaculada, aos meus irmãos Wallace e Rayane, e ao meu marido Júlio.

Agradecimentos

Nenhuma batalha é vencida sozinha. No decorrer desta luta algumas pessoas estiveram ao meu lado e percorreram este caminho como verdadeiros soldados, estimulando que eu buscasse a minha vitória e conquistasse meus sonhos.

Agradeço em primeiro lugar a Deus, que me ouviu nos momentos difíceis, me confortou e me deu forças para chegar onde estou.

Agradeço também aos meus pais, Antônio Lúcio e Imaculada, aos meus irmãos Wallace e Rayane, que não só neste momento, mas em toda a vida estiveram presentes me apoiando e me dando forças para que eu continuasse na luta durante essa etapa da minha vida. Sempre me senti segura a continuar.

Muito obrigada também ao meu marido, Júlio, que compartilhou esse momento comigo, foi muito paciente em minhas ausências e me ajudou bastante me dando dicas e apoio moral para o desenvolvimento deste e de todos os outros trabalhos da universidade.

Agradeço em especial aos meus orientadores Jean e Amanda, e ao meu coorientador Luiz Cláudio, muito obrigada por todo empenho, paciência e dedicação nesse projeto. Pela amizade e pelas risadas, palavras de incentivo e conhecimento compartilhados em todos os momentos. Foi uma honra finalizar este trabalho com a contribuição de vocês.

A todos os professores por me proporcionarem crescimento pessoal e profissional, por cada ensinamento e palavra de estímulo, muito obrigada. A todos meus colegas e amigos do CEFET por toda amizade, carinho, choros, risadas, segredos e cumplicidade compartilhada durante todos estes anos.

Aos meus tios (as), primos (as), avós e amigos que de alguma forma contribuíram para a conclusão desta etapa. Obrigada por estarem sempre presentes em minha vida.

E por fim, agradeço ao Pedro Medeiros pela confiança depositada em mim para continuar o seu trabalho. Obrigada por todo o tempo dedicado a me auxiliar e por todos os conselhos fundamentais para a minha formação.

Resumo

Com a crescente demanda de personalização de produtos de geometrias cada vez mais complexas, as impressoras 3D vem sendo cada vez mais utilizadas pois permitem uma grande versatilidade em suas impressões. A técnica mais antiga é a estereolitografia (SLA) que utiliza como matéria prima uma resina líquida fotossensível que passa por um processo de solidificação por meio de uma fonte de luz ultravioleta vindo de um projetor DLP (*Digital Light Processing*), ou por um laser configurado para um comprimento de onda específico ou, ainda, através de LEDs. Destes, são mais utilizados os processos a Laser e a DLP. O primeiro realiza a solidificação da resina ponto a ponto através do direcionamento do laser, fazendo uma varredura pela superfície a ser curada. Já o segundo utiliza a luz proveniente de um projetor para reduzir a imagem de cada camada, de forma que a cura seja de uma só vez, proporcionando maior qualidade e eficiência na impressão. Assim, Medeiros (2017) propôs o projeto e construção desse segundo modelo de impressora. Após executado, a máquina apresentou alguns problemas com relação à força de separação entre as camadas e o fundo do tanque, aderência da peça na plataforma e a danificação do revestimento do reservatório de resina. As soluções dos problemas acima citados, serão dadas por meio de estudos bibliográficos do processo de impressão da Impressora 3D SLA/DLP, substituição da plataforma de construção e do tanque de resina e de testes. Além disso, o sistema de comunicação entre máquina e usuário será aperfeiçoado partindo do uso do *Raspberry*. Portanto, a proposta dessa monografia é aprimorar a Impressora 3D de Estereolitografia por Projeção de Máscara baseada em tecnologia DLP tendo em vista a melhoria de seus parâmetros de funcionamento, contemplando as áreas de mecânica e computação. Os resultados obtidos atenderam parcialmente, uma vez que não foi possível realizar a comunicação entre impressora e interface com usuário. Concluiu-se também que a técnica de estereolitografia apresenta limitações durante todo o processo de impressão que interferem diretamente na qualidade das peças produzidas. Além disso, os estudos desenvolvidos na área são recentes, embora seja a tecnologia de impressão 3D mais antiga.

Palavras-chave: Impressora 3D, Estereolitografia, DLP.

Abstract

With the increasing demand for customization of increasingly complex geometry products, 3D printers are increasingly used as they allow for great versatility in your prints. The oldest technique is stereolithography (SLA), which uses as a raw material a photosensitive liquid resin that undergoes a solidification process by means of an ultraviolet light source from a DLP (Digital Light Processing) projector, or a configured laser. for a specific wavelength or via LEDs. Of these, Laser and DLP processes are most commonly used. The first performs the solidification of the peer-to-peer resin by directing the laser, scanning the surface to be cured. The second uses light from a projector to reduce the image of each layer, so that curing at once, providing greater quality and efficiency in printing. Thus, Medeiros (2017) proposed the design and construction of this second printer model. After execution, the machine presented some problems regarding the separation force between the layers and the bottom of the tank, adherence of the workpiece to the platform and damage to the resin reservoir casing. Solutions to the above problems will be provided through bibliographic studies of the SLA / DLP 3D Printer printing process, construction platform and resin tank replacement and testing. In addition, the machine-user communication system will be enhanced by using Raspberry. Therefore, the proposal of this monograph is to improve the DLP technology Masking Projection Stereolithography 3D Printer with a view to improving its operating parameters, covering the areas of mechanics and computing. The results obtained partially met, since it was not possible to communicate between printer and user interface. It was also concluded that the stereolithography technique has limitations throughout the printing process that directly interfere with the quality of the pieces produced. In addition, studies in the field are recent, although it is the oldest 3D printing technology.

Keywords: 3D Printer, Stereolithography, DLP.

Lista de Figuras

Figura 1: Impressora 3D DLP concluída.....	11
Figura 2: Ciclo PDCA.....	14
Figura 3: Diagrama de Ishikawa.....	15
Figura 4: Modelos maxilares impressos (superior) e modelos digitais 3D digitalizados (inferior) A) Técnica SLA; B) Técnica DLP; C) Técnica FFF; D) Técnica PolyJet.	16
Figura 5: Visão aproximada do modelo de SLA antes da rebarbação.	20
Figura 6: Visão aproximada do modelo Ming-motif modificado após rebarbação com jato abrasivo usando óxido de alumínio nº 240.....	20
Figura 7: A primeira impressora 3D inventada por Chuck Hull em 1983.....	21
Figura 8: Representação de um coração	23
Figura 9: Representação do bloco de um motor	23
Figura 10: Peça impressa com a técnica SLS.....	23
Figura 11: Peça impressa com a técnica FDM.....	24
Figura 12: Impressora 3D por Estereolitografia a laser.....	25
Figura 13: Configurações básicas da impressora 3D SLA DLP	26
Figura 14: Princípio da teoria mecânica de adesão.....	29
Figura 15: Influência da intensidade e foco de luz na formação de camada na estereolitografia por projeção.....	32
Figura 16: Modelo 3D do cubo sólido e vazado para cálculo dos fatores de compensação.	33
Figura 17: Peças com suporte.....	35
Figura 18: Exemplo de tanque de resina com fundo de vidro.....	36
Figura 19: Borracha de Silicone para Impressora 3D - PDMS.....	37
Figura 20: Silicone sendo depositado no tanque de resina.....	37
Figura 21: Exemplo de tanque de resina modulas e folhas de Teflon.....	38
Figura 22: Elementos básicos de um Sistema Embarcado.....	39
Figura 23: Raspberry Pi 3 Model B.....	40
Figura 24: Interface de controle de temperatura do OctoPrint.....	41
Figura 25: Representação do mecanismo do Tilting	43
Figura 26: Tanque de resina com fundo revestido de PDMS.	43
Figura 27: Vista da parte superior do Tanque de Resina	44
Figura 28: Vista da parte inferior do Tanque de Resina.....	44
Figura 29: Peça de encaixe do fundo do Tanque de Resina.	45
Figura 30: Projeto da nova plataforma de construção.....	46
Figura 31: Primeiro teste realizado na impressora. Escala 2,5:1.	47

Figura 32: Peça obtida no segundo teste realizado na impressora. Escala 2:1.	48
Figura 33: Resina DM-300 para Flashforge Hunter.	48
Figura 34: Tanque de Resina.	49
Figura 35: Tanque de Resina com o filme de Teflon.	49
Figura 36: Verificação do desnível da plataforma.	50
Figura 37: Nova plataforma de construção. Escala 1:2.	50
Figura 38: Modelo 3D no software Creation Workshop e ao lado a peça impressa. Escala 1:1.	51
Figura 39: Calibrador de resina EZY3D.	52
Figura 40: Primeiro teste de impressão do calibrador. Escala 1,5:1.	52
Figura 41: Segundo teste de impressão do calibrador. Escala 1,5:1.	53
Figura 42: Terceiro teste de impressão do calibrador. Escala 1,5:1.	53
Figura 43: Torre impressa após a calibração. Escala 1,5:1.	54
Figura 44: Resultado do novo teste para tempo de cura de 24s. Escala 1,5:1.	54
Figura 45: Imagem desfocada fornecida pelo projetor. Escala 1,5:1.	55
Figura 46: Tela inicial do OctoPrint conectado a impressora.	55

Sumário

1. Introdução	10
1.1 Definição do problema.....	12
1.2 Motivação	12
1.3 Objetivos	12
1.3.1 Objetivo geral	12
1.3.2 Objetivos específicos	12
1.4 Metodologia.....	13
1.5 Estado da Arte.....	15
1.6 Organização do Documento.....	17
2. Revisão da Literatura	19
2.1 Revisão Bibliográfica	19
2.2 Fundamentação Teórica.....	21
2.2.1 Impressora 3D de Estereolitografia DLP	25
2.2.2 Limitações e Parâmetros de Impressão	29
2.2.3 Sistemas Embarcados	38
3. Desenvolvimento.....	42
4. Resultados e Discussões	47
5. Conclusões e Perspectivas	57
Bibliografia.....	59

1. Introdução

A prototipagem rápida consiste em um conjunto de técnicas que agregam e ligam materiais em camadas sucessivas de forma a constituir o objeto desejado diretamente de um projeto auxiliado por computador (CAD - Computer-Aided Design) (VOLPATO, 2007). É um processo largamente utilizado nas empresas como solução, principalmente, na construção de protótipos para testes devido ao baixo custo, tempo de produção e a facilidade em realizar inúmeras alterações no projeto com base nos resultados do produto impresso. Com o desenvolvimento de novos materiais e da eletrônica, bem como o aumento da demanda no meio industrial – e, atualmente, no meio residencial - surgem novas necessidades em termos de melhoria de qualidade, maior número de protótipos e a execução de diferentes testes.

Um princípio de fabricação muito utilizado na prototipagem rápida é a manufatura aditiva ou impressão 3D. Ela consiste em adicionar camadas de um material sucessivamente até que todo o modelo esteja formado. Considerando a variedade de tecnologias de impressão 3D, destacam-se, de acordo com estado inicial da matéria-prima utilizada, a Modelagem por Fusão e Deposição (FDM - *Fused Deposition Modeling*) através de filamentos de polímeros; a Sinterização Seletiva a Laser (SLS - *Selective Laser Sintering*), cujo processo é baseado em pó; e a Estereolitografia (SLA - *Stereo Lithography Appearance*), que utiliza luz ultravioleta para a cura de resinas líquidas (BÁRTOLO, 2011).

A estereolitografia foi o primeiro processo de prototipagem disponível comercialmente, sendo apresentado ao mercado em 1988 na feira *US Autofact*, pela empresa *3D Systems Inc.* dos Estados Unidos. Esse processo utiliza uma resina fotocurável, sendo a cura obtida pela aplicação de um laser com comprimento de onda específico, geralmente UV (ultravioleta) e pode ser realizado através de técnicas como projeção de luz digital (DLP - *Digital Light Processing*) e a laser. A principal diferença entre as duas é que, enquanto o laser escaneia a superfície da camada que está sendo criada solidificando a resina ponto a ponto, o projetor ilumina a camada inteira realizando a cura de uma só vez (VOLPATO, 2007).

As máquinas de manufatura aditiva por estereolitografia utilizando tecnologia DLP apresentam vantagens como a simplicidade do sistema mecânico, a alta resolução e o excelente acabamento de superfície (HOLTRUP, 2015). Com isso, Medeiros (2017) teve como motivação a aplicação desse tipo de impressora 3D em âmbito acadêmico e a

realização de uma contribuição com o estudo acerca desta tecnologia que superasse, em alguns aspectos, o processo comum de FDM.

Esse trabalho contou com uma pesquisa científica a respeito do tema para que fosse possível elaborar um projeto em nível conceitual que minimizasse dificuldades e erros em etapas futuras. Assim, foram definidos os principais parâmetros de projeto e os materiais para a construção da impressora. Posteriormente, foram realizados os cálculos de dimensionamento das partes e as simulações necessárias para a execução do projeto. O produto resultante desse processo pode ser verificado na Figura 1.

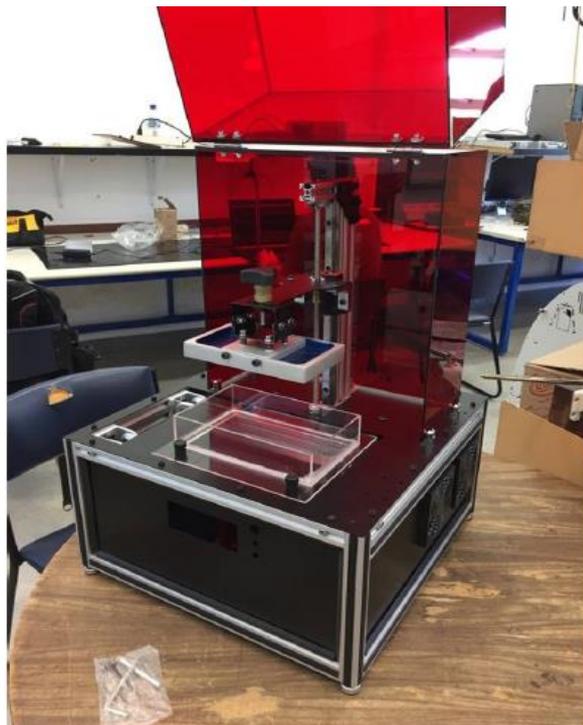


Figura 1: Impressora 3D DLP concluída

Fonte: Relatório de TCC – MEDEIROS, P.A.

Ao término do trabalho, os objetivos pretendidos foram alcançados e algumas perspectivas foram identificadas. Dentre elas estavam a necessidade de buscar soluções que reduzissem a atuação da força de separação, a realização de novos estudos no ramo de Impressão 3D e a otimização da máquina (MEDEIROS, 2017).

Portanto, este trabalho tem como pressuposto que, a partir do estudo dos parâmetros do processo de impressão, será obtido maior domínio do funcionamento da máquina. Com isso, espera-se que a mesma apresente melhoria no processo de impressão.

Logo, serão abordadas as áreas de mecânica, no que diz respeito a solucionar o problema de força de separação, e computação, quanto à melhor definição dos parâmetros programáveis da máquina e o desenvolvimento da interface de comunicação com o usuário.

1.1 Definição do problema

Este trabalho trata dos problemas apresentados na impressora 3D SLA/DLP em relação à força de separação, ao método de comunicação entre usuário e máquina e à verificação do funcionamento emergencial do sensoriamento.

1.2 Motivação

A principal motivação para a realização deste trabalho surgiu da expectativa gerada pelos resultados alcançados pelo trabalho de Medeiros (2017), os quais identificaram falhas que interferem no processo de impressão da máquina e na qualidade do produto final. Além disso, o estudo da impressão 3D de Estereolitografia por Projeção de Máscara baseada em tecnologia DLP é mais um estímulo para a realização deste projeto, dado ao fato de que se trata de uma tecnologia antiga e pouco abordada no Brasil.

1.3 Objetivos

Nestes termos, apresentam-se como objetivos deste projeto:

1.3.1 Objetivo geral

Aprimorar a Impressora 3D de Estereolitografia por Projeção de Máscara baseada em Tecnologia DLP desenvolvida por Medeiros (2017), a fim de minimizar os erros no processo de impressão e garantir maior qualidade das peças produzidas pela máquina.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar o estudo do processo de impressão e investigar o funcionamento do equipamento para definir os principais pontos de melhoria;
- Identificar a influência de cada parâmetro do processo na qualidade da impressão a fim de melhor defini-los;
- Verificar o funcionamento do sensor de fim de curso utilizado para situação de emergência por conta de alguns problemas na impressão;

- Projetar e executar um novo conceito da plataforma de construção de forma a minimizar o problema de força de separação com o tanque de resina e a adesão dos modelos impressos;
- Aperfeiçoar a interface com o usuário através do desenvolvimento de uma plataforma que permita acompanhar o andamento da impressão.

1.4 Metodologia

Como objetivo principal, este trabalho busca otimizar uma impressora 3D SLA/DLP visando maior qualidade das peças produzidas pela mesma. Para a execução desse trabalho, a metodologia foi dividida em quatro partes, são elas: estudo do funcionamento da impressora e suas limitações; utilização de um método de análise e solução de problemas para dar base científica na solução dos erros de impressão; testes ao longo do desenvolvimento a fim de verificar o funcionamento da máquina e análise dos resultados.

Para o estudo e solução de problemas, são muitos os métodos que podem ser utilizados para proporcionar meios eficientes de se obter qualidade em processos e produtos. Neste trabalho, foi escolhido o Método de Análise e Solução de Problemas (MASP). Seu uso assegura uma abordagem sequencial e estruturada para a solução de problemas, que permite entender como resolvê-lo de maneira que a situação não ocorra novamente (CANOSSA, 2011).

Para o desenvolvimento do trabalho pode ser necessário o uso de outro método e de ferramentas da qualidade para o levantamento e tratamento de dados e fatos. Uma ferramenta deve ser adaptável e de fácil utilização, permitindo que ela tenha uma larga faixa de aplicação e atenda às necessidades de seu usuário. Dessa forma, o MASP é um método baseado no Ciclo PDCA (do inglês: *PLAN - DO - CHECK - ACT* ou *Adjust*) (KUME, 1993).

O ciclo PDCA (Figura 2) foi proposto por Walter Shewhart na década de 20 e popularizado por Deming. Este método de controle é composto por quatro etapas que produzem os resultados esperados na melhoria de um processo ou produto (DEMING,1990). Para uso no MASP, cada fase deste ciclo pode ser subdividida em outras, conforme o entendimento de Campos (1992).

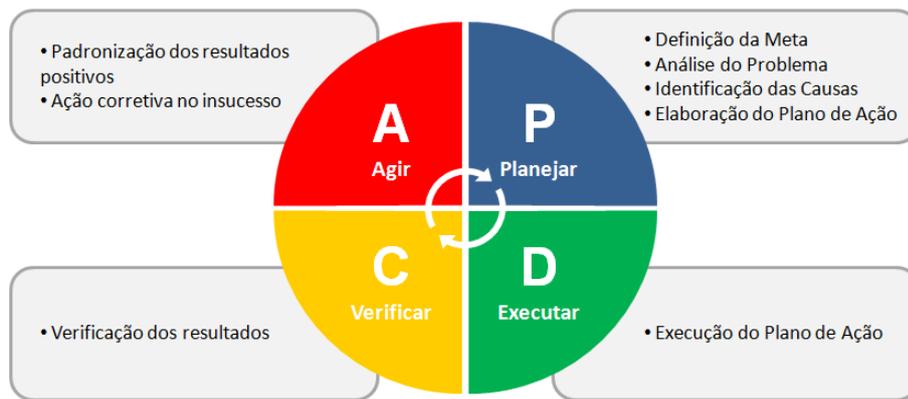


Figura 2: Ciclo PDCA

Fonte: <http://www.ccprmg.com.br/pagina3105ciclo-pdca--me-233-todo-de-geste-227-o-aplicado-em-fazendas-leiteiras---kerlen-de-sousa-macedo.aspx> (2018)

A primeira etapa é o planejamento (*Plan*), onde são tomadas decisões importantes para estabelecer metas e objetivos corretamente. Inicialmente o problema deve ser identificado e definido claramente, levando em consideração seu grau de importância, a frequência em que ocorre e quais perdas ele provoca no desempenho do produto. Após essa identificação, é necessário observar o problema de forma a investigar aspectos específicos através de uma visão ampla, para que seja possível coletar informações que não podem ser obtidas numericamente. Com isso um cronograma pode ser elaborado, um orçamento pode ser estimado, assim como uma meta pode ser definida.

Concluída a fase de observação, é o momento de analisar o que foi obtido e estabelecer hipóteses para as possíveis causas do problema. Para isso, uma ferramenta de gestão e qualidade como o Diagrama de Ishikawa (Causa e Efeito) pode ser utilizada (Figura 3). Nela são identificadas as causas principais e potenciais que podem estar afetando negativamente a qualidade do produto. Ele permite que os problemas sejam enumerados classificando-os entre Método, Matéria-prima, Mão-de-obra, Máquina, Medição e Meio ambiente (CARDOSO, et.al., 2010). Após determinadas as hipóteses, elas devem ser testadas para a verificar se há relação ou não entre a causa (hipótese) e o efeito (problema).

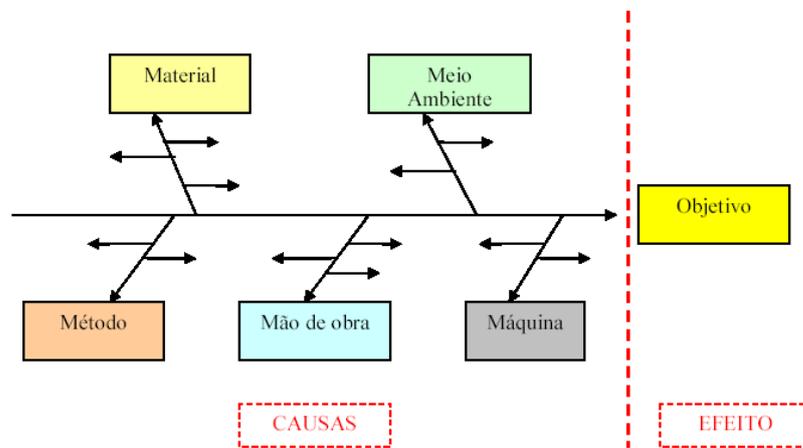


Figura 3: Diagrama de Ishikawa

Fonte: <https://www.fm2s.com.br/diagrama-causa-efeito-ishikawa> (2018)

Neste ponto, um plano de ação será preparado com o intuito de agir e bloquear as causas fundamentais sem produzir outros defeitos (PERIARD, 2010).

Segundo Cardoso *et.al.* (2010), o termo C (*Check*), é o passo onde deve ser feita a verificação. A partir dos dados coletados anteriormente, comparam-se os resultados obtidos com a meta definida inicialmente. Isso permitirá constatar a efetividade do plano de ação e o nível de redução dos defeitos. Caso o produto apresente efeitos secundários positivos ou negativos, estes devem ser listados para que seja possível confirmar a efetividade do bloqueio do problema.

Por fim, a ação (*Action*) é a etapa onde se deve atuar para corrigir definitivamente o problema. Um padrão será estabelecido, descrevendo o procedimento adotado para o plano que eliminou a causa, através de uma análise dos resultados das etapas de todo o processo (CARDOSO, *et.al.*, 2010).

1.5 Estado da Arte

No momento atual, é possível observar estudos com o intuito de comparar a qualidade de peças produzidas pelos diferentes tipos de impressora 3D para diversas aplicações. Dentre estes, destaca-se o trabalho de Kim *et.al.* (2018), onde foram avaliadas a exatidão e a precisão de modelos dentários impressos por meio de quatro técnicas diferentes. Foram cinco protótipos para cada tecnologia sendo elas, Estereolitografia a laser, Processamento Digital por Luz, Fabricação com Filamento Fundido (FFF) ou Modelagem por fusão e deposição e PolyJet. As diferenças de distribuição das variáveis medidas entre as técnicas, foram ponderadas através de uma

Análise de Variância (ANOVA). Constatou-se que há diferenças significativas entre as impressoras sendo que as tecnologias DLP e PolyJet apresentaram maior precisão (Figura 4).

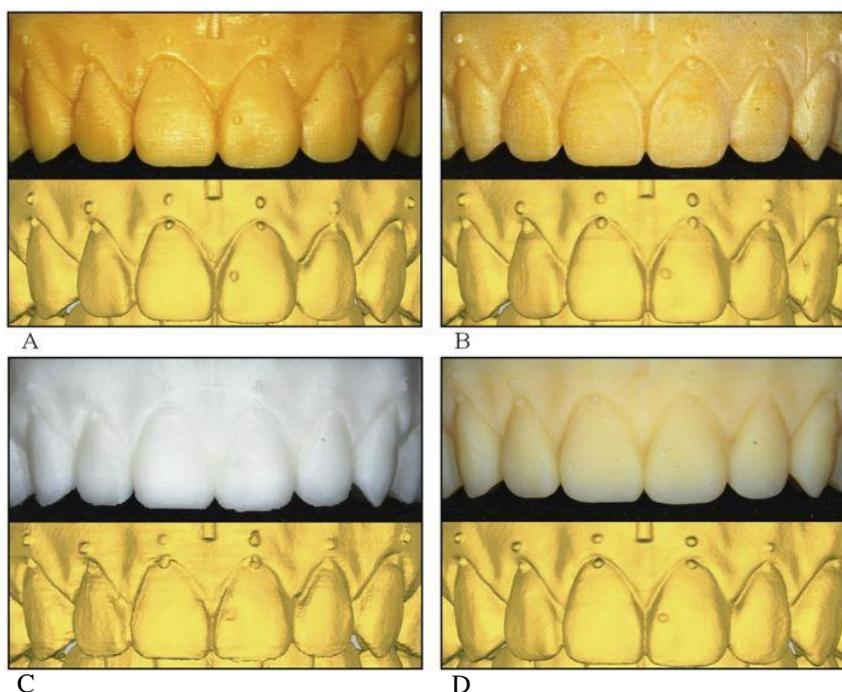


Figura 4: Modelos maxilares impressos (superior) e modelos digitais 3D digitalizados (inferior)
A) Técnica SLA; B) Técnica DLP; C) Técnica FFF; D) Técnica PolyJet.

Fonte: KIM, Soo-Yeon. *et.al.*, 2018.

Outro estudo relevante é o de Sa'ude e Ibrahim (2017), onde os autores tratam da otimização dos parâmetros de processo para a impressora 3D SLA/DLP. Este artigo investigou a influência da espessura da camada e o tempo de exposição à luz nas propriedades físicas da peça, como acabamento superficial e precisão dimensional, e nas propriedades mecânicas da estrutura, considerando resistência à tração e flexão das peças impressas. Os testes foram realizados para diferentes espessuras combinadas a diferentes tempos de exposição à luz UV. No fim, obteve-se as melhores propriedades mecânicas, juntamente com um erro dimensional mínimo para uma camada de espessura de 50 μm com tempo de exposição de 9 segundos.

Segundo Coelho (2016), a estereolitografia, devido a sua precisão e alta resolução, é bastante utilizada na fabricação de microgeometrias. Com isso, o autor realizou experimentos que avaliavam a qualidade de peças impressas através de fatores de compensação e contração. Foi desenvolvido um estudo qualitativo de peças no formato de paralelepípedos sob determinadas condições de impressão. Depois, um estudo quantitativo que avaliava se os microeixos e microfuros impressos eram estatisticamente capazes de atender aos requisitos e especificações pré-determinados,

ou seja, um estudo da capacidade do sistema. O trabalho conclui que a direção em que um objeto é impresso interfere no acabamento superficial e na geometria do mesmo, principalmente quando é construído em balanço. Constatou-se ainda, que os níveis de contração dos microfuros e microeixos não geraram resultados satisfatórios.

Com o aumento da demanda por objetos com alta qualidade para as mais diversas aplicações, Kim *et.al.* (2015) desenvolveram um estudo que descreve um Sistema de Impressão 3D de Estereolitografia de Projeção Escalonável para melhorar a precisão da estereolitografia. O sistema proposto resolve o problema onde muitos pixels não são usados na projeção ou na cura de uma peça pequena. Através de um ajuste óptico, ele continua usando a imagem original como preenchimento de toda a área de projeção. A verificação experimental mostra que o sistema proposto pode manter o mais alto nível de precisão, independentemente do tamanho da saída segundo.

Por fim, segundo Finnes (2015), as técnicas de Estereolitografia DLP e FDM são as mais utilizadas para a fabricação aditiva em nível de consumidor. O autor verifica que uma das principais vantagens da SLA é produzir peças mais rápido e com uma resolução maior quando comparada à FDM. Estas características são possíveis por conta do projetor emitir luz UV solidificando a camada toda de uma vez e devido a impressora de estereolitografia proporcionar maior resolução. Isso permite que detalhes mais complexos sejam impressos nos objetos. Uma aplicação comum, é a prototipagem de instrumentos médicos que exigem precisão em pequenas peças. No entanto, as resinas líquidas usadas neste tipo de impressora são mais caras e podem ser difíceis de trabalhar.

1.6 Organização do Documento

O presente trabalho é dividido em 5 capítulos. São eles: Introdução, Revisão de Literatura, Desenvolvimento, Resultados e Discussões, Conclusões e Perspectivas. No primeiro capítulo é feita uma contextualização acerca do tema, os estudos mais recentes sobre o assunto abordado neste trabalho, a problematização, os objetivos de projeto e a metodologia escolhida para o seu desenvolvimento.

No capítulo seguinte, são tratados os principais conceitos necessários para a realização do trabalho e um breve histórico do processo de Estereolitografia.

No terceiro capítulo, são descritas as atividades desenvolvidas a fim de concluir os objetivos propostos neste trabalho.

No quarto capítulo, estão evidenciados os resultados obtidos a partir dos passos anteriores.

Por fim, são feitas algumas considerações a respeito do desenvolvimento deste projeto e sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão da Literatura

Este capítulo descreve um breve histórico sobre o desenvolvimento e aplicações das impressoras 3D de estereolitografia e os principais conceitos referentes a este trabalho.

2.1 Revisão Bibliográfica

Em 1983, Chuck Hull criou a primeira peça impressa em 3D através da estereolitografia, transformando-o no pioneiro da técnica. No ano seguinte a patente do processo foi registrada e dois anos depois a *3D Systems* foi cofundada por Hull, tornando-se assim a primeira empresa de impressão 3D do mundo. Em seguida, no ano de 1987 a empresa comercializou sua primeira impressora de estereolitografia, a SLA-1. Pouco depois, em 1989, foi emitida também a patente da Sinterização Seletiva a Laser (3D SYSTEMS, 2018, online).

As impressoras 3D foram evoluindo lentamente com o surgimento de novos materiais e técnicas. Porém, o alto custo do sistema de impressão e as limitações do software CAD, tornaram a máquina útil apenas para processos industriais. Um estudo de HIROWATARI e IKUTA (1993) foi realizado para desenvolver uma técnica de microfabricação tridimensional usando a estereolitografia. O processo é chamado de IH (*Integrated Hardened polymer stereolithography*) e é adequado para microestruturas feitas de polímeros e metais.

Ao longo do tempo as possibilidades de se aplicar a estereolitografia foram surgindo em outros âmbitos, como em joalherias. Leong, *et.al.* (1998) descreveram os resultados de uma investigação sobre o efeito de processos de rebarbação com jato abrasivo no acabamento superficial de modelos de joias construídos através de estereolitografia (Figura 6). Este processo de impressão resultou em camadas visíveis na superfície do modelo, mostrando que a técnica SLA apresentava problemas de resolução (Figura 5).

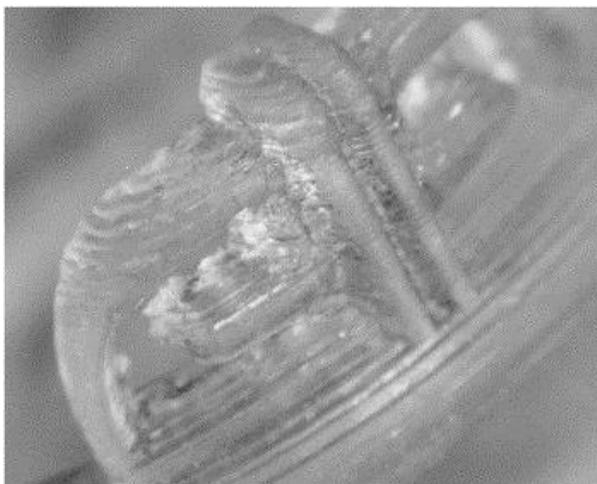


Figura 5: Visão aproximada do modelo de SLA antes da rebarbação.

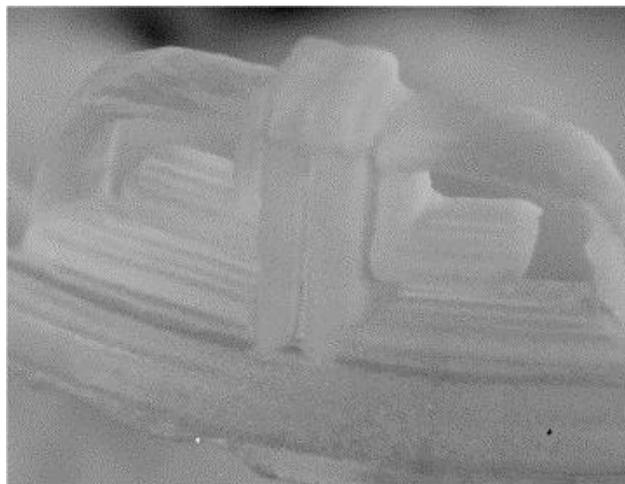


Figura 6: Visão aproximada do modelo Ming-motif modificado após rebarbação com jato abrasivo usando óxido de alumínio nº 240.

Fonte: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013698000417> (2018)

A tecnologia de impressão 3D passou a ser amplamente aplicada também na medicina através da confecção de moldes para implante com o auxílio de exames de imagem como tomografia ou ressonância. O modelo pode auxiliar na condução de casos complexos e contribuir para a redução do tempo cirúrgico, risco de infecções e um resultado estético melhor para o paciente (PRADO, 2005).

No ano seguinte, um novo estudo determinou a precisão dimensional de quatro modelos de crânios humanos adultos, impressos por estereolitografia, partindo de modelos 3D gerados através de uma tomografia computadorizada. Oito medições lineares foram realizadas nos crânios reais e nos protótipos e repetidas cinco vezes. Observou-se que a diferença absoluta entre os crânios humanos e as réplicas foi de 0,23mm com um desvio padrão de 1,37mm. O grau do erro obtido era aceitável em aplicações clínicas no campo da cirurgia odontológica para planejamento de tratamentos dentários (NIZAM, *et.al.*, 2006).

Costa (2012) realizou uma pesquisa sobre o processo de estereolitografia e a viabilidade de utilizá-lo no desenvolvimento de protótipos de novos modelos de veículos automotivos. O estudo compara a impressão com o processo de usinagem a fim de verificar se o primeiro se mostra eficiente. Os resultados mostraram que a prototipagem rápida reduziu significativamente o tempo de produção, mas que ainda existem peças que devem ser fabricadas no processo de usinagem.

Em 2013, César realizou um estudo de avaliação do posicionamento do canal mandibular em protótipos biomédicos. O trabalho contou com duas etapas, sendo a primeira uma investigação dos critérios para obtenção de moldes para aplicações

médicas e o segundo avaliou a precisão do canal mandibular entre as mandíbulas reais e as impressas. Os resultados mostraram que houve uma diferença relativa estatisticamente significativa de cerca de 10,21% entre os biomodelos e as mandíbulas secas. Localizar o canal mandibular com precisão é pré-requisito crítico para muitos dos procedimentos cirúrgicos realizados na mandíbula. Portanto são necessários mais estudos antes que se utilize a prototipagem estereolitográfica para aplicações que requerem extrema precisão.

Diante do que foi exposto, durante o desenvolvimento da técnica de estereolitografia ao longo do tempo, é possível perceber que os estudos referentes à qualidade deste processo são recentes e pouco abordados no Brasil. Portanto, é válido ressaltar a importância de se investir em pesquisas nesse sentido, visto que as impressoras SLA proporcionam maior precisão, resistência e acabamento superficial em relação as demais.

2.2 Fundamentação Teórica

No início da década de 80 surgiram os resultados das primeiras pesquisas que investigavam e procuravam desenvolver tecnologias que fossem capazes de construir objetos a partir de um modelo tridimensional, geralmente em um formato STL (*Standard Triangle Language*), desenhado em um programa CAD (BEAL 2002). O pioneiro deste movimento, Chuck Hull, inventou a estereolitografia em 1983 ao imprimir uma peça em 3D com a SLA-1, primeira impressora desenvolvida pela 3D Systems e que veio a ser comercializada somente em 1987, mostrada na Figura 7.



Figura 7: A primeira impressora 3D inventada por Chuck Hull em 1983

Fonte: <http://my3dconcepts.com/explore/history-of-3d-printing/> (2018)

Estas tecnologias ficaram conhecidas como Prototipagem Rápida, pois confeccionavam objetos que tinham como objetivo, inicialmente, contribuir para o trabalho de equipes de engenharia na visualização, levantamento de dados, montagem

e teste de novos produtos, permitindo um desenvolvimento mais rápido dos mesmos (BEAL 2002).

Os processos de fabricação aditiva usam as informações de um arquivo de desenho auxiliado por computador (CAD) que é posteriormente convertido em um arquivo de estereolitografia (.stl). Nesse processo, o desenho feito no software CAD é aproximado por triângulos e fatiado, contendo as informações de cada camada que será impressa. Entre os principais avanços que esse processo apresentou para o desenvolvimento de produtos são a redução de tempo e custo, a interação humana e, conseqüentemente, o ciclo de desenvolvimento de produtos, também a possibilidade de criar praticamente qualquer formato que possa ser muito difícil de usinar. No entanto, atualmente, ele ainda não é adotado no setor de manufatura, mas é usado por cientistas, médicos, estudantes e professores, pesquisadores de mercado e artistas. Com a prototipagem rápida, cientistas e estudantes podem criar e analisar rapidamente modelos para compreensão e estudos teóricos. Os médicos podem criar um modelo de corpo danificado para analisá-lo e planejar melhor o procedimento, os pesquisadores de mercado podem ver o que as pessoas pensam de um novo produto em particular, e a prototipagem rápida facilita para os artistas explorar sua criatividade (WONG E HERNANDEZ, 2012).

Neste contexto, dentre as diversas tecnologias de impressão 3D que surgiram ao longo do tempo, destacam-se cinco tipos. A mais recente é a impressora *PolyJet Objet Geometries* cuja patente foi registrada em 2012. A tecnologia consiste em uma cabeça de impressão que deposita uma resina plástica sobre uma superfície plana ao mesmo tempo que emite luz ultravioleta para curar as camadas. Ela permite ainda, imprimir mais de um material na mesma peça. (DROPLAB, 2018, online). De acordo com o site do fabricante, *Stratasys* (2018), a impressora confere resolução de camada microscópica e precisão de até 0,1 mm, o que a torna vantajosa para aplicações médicas e ortodônticas principalmente (Figura 8), além de atender até mesmo o mercado automotivo (Figura 9).



Figura 8: Representação de um coração

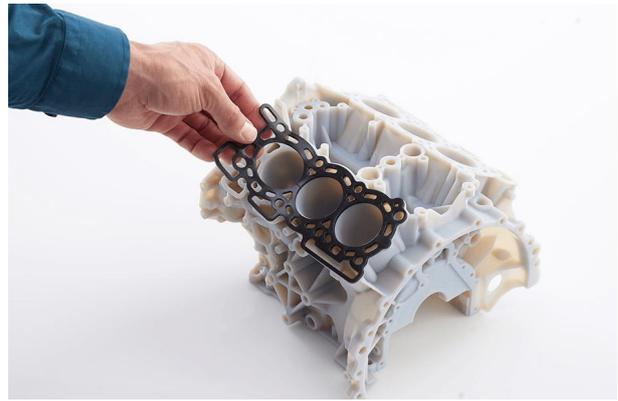


Figura 9: Representação do bloco de um motor

Fonte: <http://www.stratasys.com/pt-br/polyjet-technology> (2018)

A tecnologia SLS (Sinterização Seletiva a Laser), criada na década de 80 por Carl Deckard, utiliza um laser de CO₂ para fundir um material em forma de pó que pode ser metálico, de nylon ou cerâmico. O material é depositado por um rolo em finas camadas sobre uma superfície onde o laser realiza uma varredura e funde o pó. Devido a possibilidade de utilizar material metálico nesta tecnologia, uma vantagem é a resistência que a técnica permite que o material tenha a impactos, temperaturas e esforços mecânicos. Em contrapartida, o acabamento superficial é rugoso, necessitando de um tratamento posterior (Figura 10).



Figura 10: Peça impressa com a técnica SLS

Fonte: <http://3dcriar.com.br/v2/sls/> (2018)

O fundador da Stratasys, Scott Crump, inventou a tecnologia Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) há mais de 20 anos e a empresa continua liderando a revolução da impressão 3D desde então (STRATASYS, 2018, online). Com a expiração da patente desta técnica, o usuário doméstico foi beneficiado com a grande variedade

de projetos abertos disponíveis na internet, tornando acessível a construção desta impressora. A FDM utiliza como matéria prima um filamento termoplástico que é aplicado por um bico de uma extrusora sobre uma mesa aquecida. As camadas possuem resolução variável, de 0,05mm a 0,5mm, de acordo com o bico utilizado (Figura 11).



Figura 11: Peça impressa com a técnica FDM

Fonte: <http://www.stratasys.com/fdm-technology> (2018)

A estereolitografia é a técnica de impressão mais antiga. Ela utiliza uma cuba preenchida com resina com fotopolímero líquido que é curado por uma luz de irradiação ultravioleta. Esta luz fornece a energia necessária para induzir uma reação química na resina, unindo grandes quantidades de pequenas moléculas realizando as ligações no polímero (BÁRTOLO, 2011).

O processo de fabricação de estereolitografia possui duas abordagens básicas: escrita direta, ou a laser, e escrita baseada em projeção de máscara. No primeiro caso, um feixe de luz é direcionado no plano X e Y através de um conjunto de espelhos dinâmicos de forma a percorrer a superfície com resina e solidificar a mesma ponto a ponto conforme mostra a Figura 12. O direcionamento é feito através dos comandos enviados pelo computador, que recebe informação do modelo fatiado para realizar este controle. Após percorrer a superfície desenhando a camada, a plataforma de construção se desloca verticalmente para baixo. Assim, a resina líquida ocupa o espaço deixado para que uma nova camada seja construída até que a peça seja finalizada (BÁRTOLO, 2011).

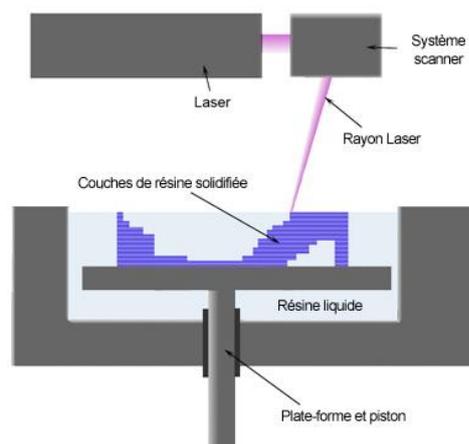


Figura 12: Impressora 3D por Estereolitografia a laser

Fonte: <http://pt.3dilla.com/impressora-3d/estereolitografia/> (2018)

A técnica de impressão 3D de Estereolitografia por Projeção de Máscara é descrita a seguir com mais detalhes pois será o modelo utilizado no presente trabalho.

Para efeitos de comparação, na Tabela 1 estão listados os principais modelos de impressoras 3D.

Tabela 1: Comparação entre as tecnologias de impressão 3D.

Tecnologia de Impressão	Matéria-prima utilizada	Resolução	Acabamento	Velocidade de impressão
Poly Jet	Fotopolímero líquido	Alta	Refinado	Alta
SLS	Pó de nylon, metal ou cerâmica	Média	Áspero	Rápida
FDM	Filamentos termoplásticos	Média	Ápero	Lenta
SLA Laser	Fotopolímero líquido	Alta	Refinado	Média
SLA DLP	Fotopolímero líquido	Alta	Liso	Rápida

Fonte: <http://pt.3dilla.com/impressora-3d/> (2014)

2.2.1 Impressora 3D de Estereolitografia DLP

A Estereolitografia por Processamento de Luz Digital (DLP) é uma tecnologia que foi desenvolvida pela Texas Instruments no final da década de 1980. A técnica utiliza um chip chamado DMD (*Digital Micromirror Device*), comumente utilizado em projetores e

aparelhos de televisão de alta definição, que possui milhões de espelhos controláveis que se organizam para formar uma imagem (KATAL, *et.al.* 2013). A fonte UV do projetor emite um feixe de luz que passa através de uma lente interna do equipamento e atinge o chip DMD. Nele a imagem é formada e projetada diretamente ou em outro espelho, dependendo da posição em que o projetor está na impressora. Dessa forma, a camada cura completamente e a plataforma se afasta dando espaço para que uma nova seja formada (COELHO, 2016).

Na tecnologia DLP, há dois tipos de construção (Figura 13). A primeira realiza a cura através da exposição de topo (*Top-Down*), onde a superfície do polímero líquido é livre e a imagem é projetada diretamente na resina. Assim que se completa a cura, a plataforma desce e um sistema de nivelamento passa alisando a superfície para que a cura da camada seguinte comece. A segunda configuração é através da exposição de fundo (*Bottom-Up*), onde uma fina camada de fotopolímero líquido é restringida entre a plataforma e o fundo do reservatório. A luz penetra na superfície inferior transparente e cura a resina. Ao subir a plataforma, um novo líquido preenche a lacuna dando origem a outra camada. Nesse modelo não é necessário o uso de nivelador e a profundidade do reservatório é independente da altura da peça a ser produzida (PAN, *et.al.* 2016).

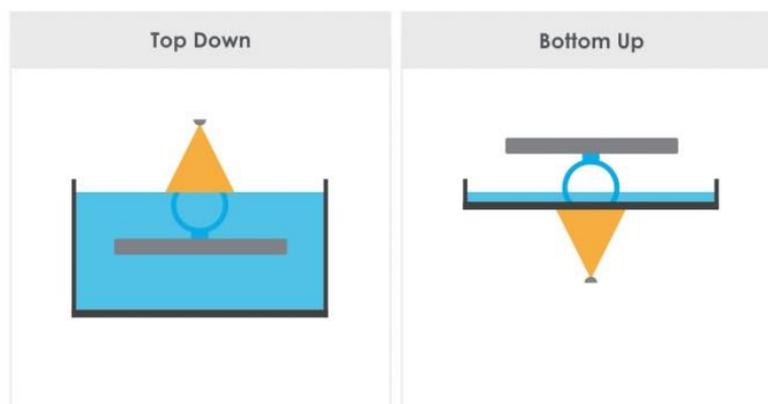


Figura 13: Configurações básicas da impressora 3D SLA DLP

Fonte: <http://theorthocosmos.com/bottom-vs-top-vs-clip-3d-printing/> (2018)

A configuração utilizada na Impressora 3D de Medeiros (2017) é a *Bottom-Up*. Este formato apresenta vantagens em relação ao *Top Down*: a quantidade de resina é menor, pois a profundidade do reservatório é independente da altura da peça a ser produzida. Além disso, as camadas tendem a ser mais planas devido ao contato com o fundo do reservatório ser restrito, e a não obrigatoriedade de se utilizar um nivelador. Em contrapartida, a dificuldade em separar uma camada recém curada da superfície restrita é uma barreira técnica que prejudica significativamente a capacidade de fabricação da

impressora. Outra desvantagem que pode-se citar é que a força de separação gerada limita o tamanho da peça a ser impressa, a velocidade e confiabilidade do processo de impressão e o ciclo de vida da superfície inferior do reservatório. Além disso, seu excesso leva a muitos defeitos e falhas de construção, incluindo orifícios nas peças impressas, adesão de camadas curadas no fundo da bacia, camadas separadas ou a quebra da parte que já foi construída (PAN, *et.al.* 2016).

A adesão entre uma camada curada e o tanque de resina é resultado da força de Van der Waals, força de ligação química e força de sucção. Para reduzir a adesão, filmes ou revestimentos quimicamente inertes, como Teflon ou o silicone Polidimetilsiloxano (PDMS), são aplicados no fundo do tanque para evitar que a camada de resina curada se ligue ao tanque. Embora o silicone não forme ligações químicas com a maioria dos materiais, ele é facilmente deteriorado pela resina sob extensa exposição aos raios UV. Podendo ficar embaçado, deformado ou formar fortes ligações com a resina curada após muitas camadas de impressão. No entanto, mesmo com essa melhoria, a força de separação ainda é consideravelmente grande para realizar impressões de alta resolução (SYAO, 2014).

O esforço necessário para desprender as camadas curadas, é determinado por um efeito combinado das propriedades do polímero líquido, da geometria de impressão da peça (área e forma) e das configurações do sistema de fabricação. Neste caso, considerando uma peça sólida cilíndrica de raio R , cuja superfície inferior é rígida, e a viscosidade da resina é constante e não muda com o tempo, é possível desenvolver um modelo analítico desta força. Com base nas equações de *Navier-Stokes* (Bruus, 2008) e a equação de conservação da massa, a força de separação pode ser descrita da seguinte forma (1) (PAN, 2017):

$$F = \frac{3\pi \cdot \mu V}{2 \cdot h^3} \cdot R^4 \quad (1)$$

Ou seja, a viscosidade do material (μ), a espessura da camada (h), a velocidade de tração (V) e a geometria de impressão, que pode ser caracterizada pelo raio R quando é um cilindro sólido, estão associadas à força de separação. Observa-se que F não é linear com R e h mas é linear com V e, entre esses fatores, a velocidade e a espessura de camada são parâmetros do processo que podem ser controlados. Em contrapartida, a viscosidade da resina e a geometria de impressão (R) são determinadas de acordo com a solicitação dos clientes. Neste caso, de acordo com o modelo físico, a força de

separação diminui com a diminuição da velocidade V e o aumento da folga h (PAN, 2017).

Ainda tratando de força de adesão, deve-se citar a ligação entre as camadas da peça e a superfície da plataforma de impressão. Esse processo tem forte dependência do tipo de substrato, do tipo de adesivo e das forças envolvidas nesta junção, que são adesiva e coesiva (PETRIE, 2000). A primeira refere-se à superfície do adesivo e a superfície do substrato. Ela depende da qualidade do material aderente e de uma superfície limpa, sem contaminantes que possam agir sobre a adesão ou influenciar no contato das partes (SILVA *et.al.*, 2007). A segunda é responsável por manter a estrutura química do adesivo unida entre si (GASPARIN, 2011), propriedade importante para garantir a junção entre as camadas de resina curadas.

Para que ocorra o contato e fixação entre o adesivo e a superfície, existem forças mecânicas, químicas e física que se sobrepõem e se influenciam dando origem a quatro teorias de gerais de adesão: eletrostática, adsorção, difusão e mecânica (ZHANG *et al.*, 2018). A definição básica da teoria eletrostática é a diferença de eletronegatividade entre as partes a serem unidas. Ou seja, através da transferência de elétrons entre o substrato e o adesivo, uma parte é carregada positivamente e a outra negativamente. A adsorção é considerada a teoria mais importante do mecanismo de adesão e é resultante do contato intermolecular entre os dois materiais. A teoria da difusão ocorre apenas em materiais poliméricos sendo que, se forem materiais iguais é dado o nome de autoadesão e se forem diferentes é chamado de heteroadesão. Nela, a extremidade de uma cadeia polimérica difunde na estrutura da outra superfície formando a ligação. Por fim, a adesão mecânica ocorre quando o adesivo penetra nas cavidades e irregularidades da superfície do substrato e, ao se solidificar, ocorre o travamento mecânico (PACKHAM, 2005).

O intertravamento mecânico é a teoria mais antiga proposta (SILVA *et.al.*, 2007). Para que ocorra um bom ancoramento entre as partes, espera-se que o adesivo possua boa molhabilidade e seja capaz de preencher os espaços vazios do substrato expulsando as bolhas de ar presas. Além disso, uma boa maneira de aumentar a adesão é realizando um tratamento superficial. Ele aumenta a rugosidade da face que receberá o aderente, conseqüentemente aumenta também a superfície de contato entre eles como mostra a Figura 14. A área rugosa causa uma deformação plástica no adesivo e este, por sua vez, absorve energia aumentando a força da união adesiva. Além disso, ela fornece uma barreira à propagação de trinca (PETRIE, 2000).

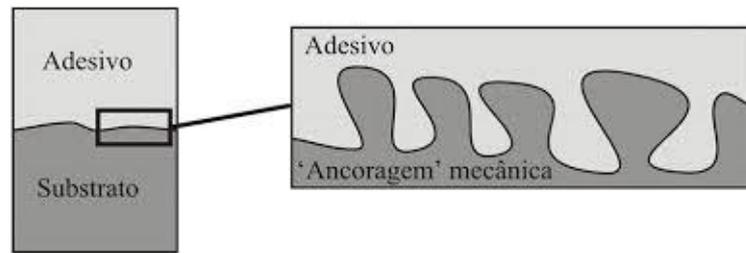


Figura 14: Princípio da teoria mecânica de adesão

Fonte: Silva et. al., 2007.

O processo de manter continuamente o contato entre o adesivo e o substrato é conhecido como molhabilidade. Uma boa molhabilidade garante que o adesivo flua dentro dos vales da superfície rugosa. Em contrapartida, quando esta característica é ruim, o adesivo cria uma ponte sobre os vales, interligando os picos. Dessa maneira, as superfícies a serem unidas não ficam próximas, impedindo a atuação das forças de adesão, além de reduzir a área de contato entre as partes e aprisionar minúsculas bolhas de ar na interface de adesão (PETRIE, 2000). De acordo com Bikerman (1961), essas são propensas a migrar para dentro da camada adesiva, durante o processo de cura, tornando a ligação fraca. Além das bolhas de ar, poeira, óleos, óxidos e etc., são fatores contaminantes que podem favorecer também a formação de uma camada fraca comprometendo a força máxima de ruptura da junta.

Portanto, ter um substrato limpo também é um elemento importante para que ocorra uma boa adesão (PETRIE, 2000). Os contaminantes devem ser retirados da superfície através de uma limpeza simples com álcool isopropílico ou acetona leve ou de forma mais severa através de lixamento. Essa limpeza, evita a formação da camada fraca que, como visto anteriormente, prejudica o desempenho do adesivo (SILVA *et.al.*, 2007).

2.2.2 Limitações e Parâmetros de Impressão

No processo de SLA, assim como em outras técnicas, diversas imperfeições podem ocorrer nas peças impressas. A estereolitografia, por consequência da resolução do feixe de luz e da espessura da camada, proporciona grande precisão e qualidade em seus produtos. Portanto, alguns parâmetros podem influenciar no resultado final da peça produzida. De acordo com um estudo desenvolvido por Chen *et.al.* (2000), é possível enumerar cinco limitações dos parâmetros do processo de estereolitografia que podem juntos ocasionar erros de 250 a 500µm. São elas: erros cometidos pelo software 3D

(CAD/CAM), erros na projeção do feixe de luz UV, contração da peça no momento de cura, parâmetros de processo mal definidos e um pós-processo inadequado.

Os erros provenientes dos softwares 3D são comuns a qualquer tipo de processo de manufatura aditiva. Segundo Groover (2014), o problema de aproximação numérica ocorre no momento em que o arquivo STL é gerado, apresentando diferença entre a espessura da camada do desenho e a camada real que será impressa. Outro problema apresentado é a aproximação da superfície por triângulos, princípio utilizado para recriar a geometria de superfície de um modelo sólido. Esse pode ser observado principalmente em superfícies côncavas e convexas maiores. O mesmo pode ser resolvido refinando a malha de triângulos nas partes da peça que requerem maior precisão (COELHO, 2016).

Segundo Phan *et.al.* (1999) e Chockalingam *et.al.* (2008), deve-se levar em consideração também o tamanho e geometria das camadas e a posição e orientação do modelo em relação ao feixe de luz do projetor. Tais fatores influenciam nas superfícies planas e lisas da peça que podem ser obtidas ou não, comprometendo a qualidade superficial. O efeito de degraus é perceptível se a superfície não for perpendicular ao feixe de luz UV e a espessura da camada for maior. Outra característica a ser considerada é a distribuição de luz do projetor, pois o feixe não possui um foco perfeito. Quando esse problema é tratado, a resina é perfeitamente curada, caso contrário, as camadas não são solidificadas perfeitamente.

A determinação do tempo de cura é um parâmetro importante a ser definido, pois um tempo reduzido proporciona menor precisão devido à má ligação entre as camadas. Por outro lado, um tempo de projeção muito longo aumenta o processo de construção provocando uma aderência maior e camadas mais espessas que o desejado. Esse tempo pode variar, inclusive, de acordo com a resina utilizada no processo pois cada polímero possui propriedades químicas específicas que interferem na quantidade de radiação que ela absorve. (BÁRTOLO, 2011).

No que se refere ao tratamento de pós-processo, é de suma importância realizar a limpeza correta da peça para garantir a precisão das dimensões e acabamento superficial. O modelo deve ser lavado com álcool isopropílico para remover completamente a resina, principalmente em furos e locais de geometria complexa. Caso a limpeza seja inadequada, a resina pode curar danificando a superfície da peça, assim como expô-la excessivamente ao álcool também é desfavorável. Já a pós-cura é um procedimento usado para terminar o processo de fotopolimerização das partes da peça

que não foram curadas completamente. Ele aumenta a porcentagem de ligações cruzadas entre as cadeias da resina, melhorando as propriedades mecânicas e térmicas, evitando que ela deforme. Nesta etapa, a probabilidade de o objeto contrair ou dilatar é maior (COELHO, 2016).

Além dos citados, existem outros parâmetros do processo que podem influenciar a qualidade final da peça em termos de precisão e acurácia. Dentre os mais importantes estão o tipo de resina utilizado e o número de espelhos presentes no DMD na estereolitografia por projeção (COELHO, 2016).

2.2.2.1 Projetores

O estudo realizado por Kovalenko e Garan (2017) compara as características de dois projetores a fim de determinar qual deles apresenta maior eficiência na impressão 3D pela tecnologia DLP. O processo de solidificação começa quando o feixe de luz UV passa pelo chip DMD para que cada pixel seja controlado em sua matriz e a imagem projetada seja formada corretamente. Ou seja, o chip entrega uma imagem com pontos brancos e outros pretos. A polimerização acontece na região branca e na região preta a resina continua líquida. A precisão da imagem formada depende da resolução do chip DMD e do tamanho da área a ser impressa.

Ao emitir o feixe de luz na resina, a camada a ser curada absorve luz e esse processo só é interrompido quando a irradiação diminui abaixo do valor limite, restringindo assim, a espessura da camada impressa. A intensidade de UV projetado decai exponencialmente ao longo da espessura da camada. A Lei de Absorção de Beer Lambert descreve esse fenômeno relacionando a Dose de radiação ultravioleta ao longo da profundidade através da seguinte fórmula (2) (EMAMI *et.al.*, 2014):

$$E(z) = E_{max} e^{-\frac{z}{D_p}} \quad (2)$$

Onde $E \left[\frac{mJ}{cm^2} \right]$ é a Dose de radiação, $z[cm]$ é a profundidade, $D_p[cm]$ é a profundidade de penetração da resina de acordo com o comprimento de onda da luz UV e $E_{max} \left[\frac{mJ}{cm^2} \right]$ é a dose de radiação de luz UV na superfície da resina.

Dose é uma unidade para a quantidade de energia luminosa absorvida por algum material quando este é exposto a radiação. (HOLTRUP,2015). Como a Dose está relacionada com o material, ela varia de acordo com a característica de cada resina. Então para que se inicie o processo de cura, é necessário verificar qual a Dose crítica

$E_c \left[\frac{mJ}{cm^2} \right]$. A profundidade em que a radiação será superior a E_c e a resina começa a curar, chama-se profundidade de cura e é representada por $C_d[cm]$ (EMAMI *et.al.*, 2014).

Então, utilizando uma equação adaptada de Beer-Lambert, que descreve o decaimento exponencial da radiação UV, temos (3):

$$C_d = D_p \ln \left(\frac{E}{E_c} \right) \quad (3)$$

Com isso, é possível perceber que a profundidade de resina curada cresce de forma logarítmica com a quantidade de dose de radiação aplicada (E). A dose de radiação crítica depende de vários fatores inerentes a resina utilizada, como, por exemplo, concentração de foto-iniciadores na resina, presença de oxigênio dissolvido ou outros inibidores. (EMAMI *et.al.*, 2014).

ZHOU *et. al.* (2000) descreve que a distribuição de energia ao longo de um pixel de luz pode ser aproximada por uma curva gaussiana. Então, sabendo que um feixe de luz não possui um foco perfeito, a projeção por um espelho UV pode ser aproximada por uma curva gaussiana também. A Figura 15 representa três condições de exposição da luz UV na cura de uma camada de resina (WANG, *et.al.* 1996)

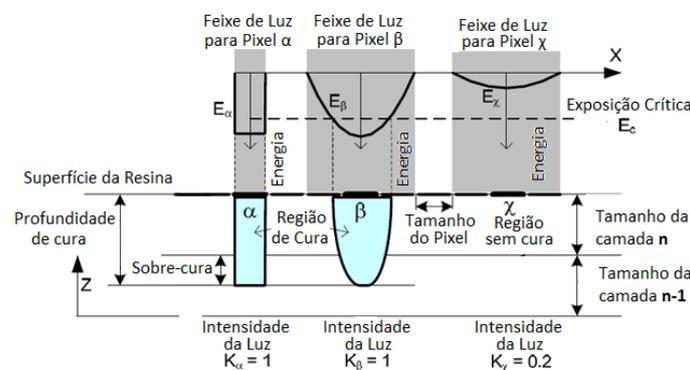


Figura 15: Influência da intensidade e foco de luz na formação de camada na estereolitografia por projeção.

Fonte: WANG, *et. al.* 1996.

A primeira condição (α) mostra uma distribuição de luz ideal e desejada ao longo do pixel. Com o feixe focado, a região de cura da resina é perfeitamente quadrada. No segundo caso (β) o feixe de luz obedece a distribuição gaussiana. A energia é emitida nos pixels vizinhos fazendo com que a parte curada tenha um formato parabólico. Por fim, a condição colocada para o pixel X é de uma intensidade de luz menor. Nesse caso a intensidade de energia não atinge a dose crítica e a resina não é curada (WANG, *et.al.* 1996).

2.2.2.2 Orientação e geometria da peça

Segundo Coelho (2018), das limitações que podem influenciar na qualidade das peças impressas através da estereolitografia, a mais crítica é a contração dimensional. O fenômeno de contração acontece tanto no decorrer da impressão da peça quanto na fase de pós-cura onde a taxa de radiação UV é maior. A solidificação da resina faz com que número de ligações covalentes aumente, e essas por serem mais fortes que as forças intermoleculares de Van der Waals, promovem contração da área da camada. Em contrapartida, quanto menor o grau de polimerização maior a quantidade de monômeros presentes na peça, o que pode influenciar negativamente nas propriedades mecânicas, como resistência a tração e flexão (CHANG, 2013). Desse modo, a contração está diretamente relacionada ao grau de polimerização da resina e, conseqüentemente, aos elementos que atuam no mesmo diretamente, por exemplo, a concentração de fotoiniciadores, a intensidade da radiação, a temperatura de cura e a estrutura do monômero (WANG, 1996).

Para evitar que o fenômeno de contração não afete a acurácia das peças fabricadas, recomenda-se adicionar um fator de compensação para as dimensões x e y da peça. A empresa 3D Systems apresenta em um manual de instruções uma proposta de cálculo dos fatores de compensação a serem considerados. Nele são recomendados dois tipos de cubos a serem construídos para determinação desses fatores. Um cubo sólido e outro vazado, conforme Figura 16. Com o uso desses fatores, a máquina vai curar uma área maior que o indicado no modelo 3D e, com isso, irá compensar a contração da peça (COELHO, 2016).

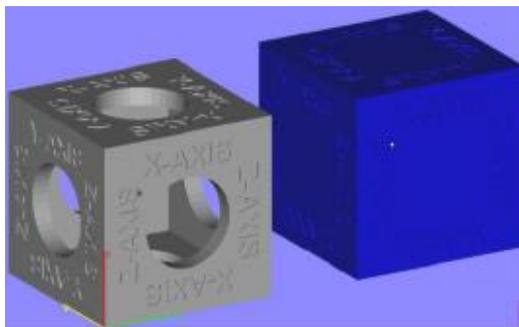


Figura 16: Modelo 3D do cubo sólido e vazado para cálculo dos fatores de compensação.

Fonte: COELHO, 2016.

Assim como a contração, a dilatação das peças também pode ocorrer em dois momentos; durante a construção da mesma dentro da máquina ou durante a aplicação do solvente na etapa de pós-processo.

Durante a aplicação do solvente, a resina pode não ser completamente retirada em partes de difícil limpeza. Como consequência, os monômeros não removidos se solidificam durante a fase de pós-cura, alterando a dimensão da peça. Além disso, quando a peça é exposta ao solvente em uma quantidade de tempo além do recomendado, pode ocorrer a dilatação (GUIMARÃES, 2006).

A segunda forma de dilatação é no momento de construção da peça. Caso ela fique submersa por muito tempo dentro do reservatório com resina, as superfícies externas podem absorver a resina líquida fazendo com que ocorra o aumento de suas dimensões, sendo mais comum na estereolitografia *Top Down*, pois a peça vai submergindo no reservatório (DAVIS, 2001).

Ainda segundo Davis (2001), para que a camada que está sendo construída se ligue à camada anterior, é necessário que haja cura além da sua espessura. Dessa forma, é dado o nome de sobre-cura à profundidade que a luz UV deve curar além da espessura de uma nova camada. Porém, caso a última camada seja uma superfície saliente da peça, essa sobre-cura irá curar regiões que não fazem parte da mesma afetando sua qualidade. Portanto, a consequência principal é a alteração nas dimensões no eixo z e pior rugosidade em superfícies salientes.

De acordo com Zhou *et.al.* (2013), partes salientes de uma peça podem sofrer distorções caso não haja o uso de suportes sob essas áreas. Além de fazer com que a primeira camada fique unida à plataforma, o uso de suportes restringe o movimento indesejado dessas áreas suspensas durante a construção. Na estereolitografia *Top Down* o suporte contribui para que a força da gravidade e tensões causadas pela contração da resina durante a fotopolimerização não deformem essas partes em balanço. Já na estereolitografia *Bottom-Up*, além de contribuir para que não haja tensões de contração, o mesmo previne que a força de descolamento da peça do reservatório deforme a área. O uso de suportes ainda permite que o objeto seja separado facilmente da plataforma de construção após sua fabricação como mostra a Figura 17 (GOMIDE, 1999).

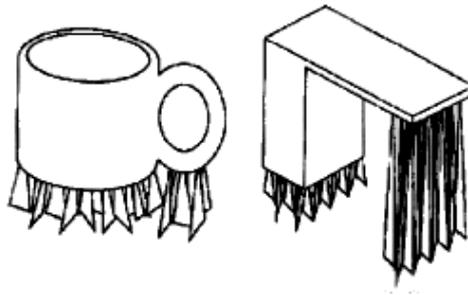


Figura 17: Peças com suporte.

Fonte: GOMIDE, 1999.

2.2.2.3 Resinas

As resinas poliméricas podem ser um dos parâmetros mais importantes para precisão na impressão DLP. Embora a gama de resinas comercialmente disponíveis seja grande, todas são baseadas na mesma combinação de ingredientes: consistem em monômeros / oligômeros, um fotoiniciador (às vezes múltiplos misturados para trabalhar em uma faixa mais larga de comprimentos de onda) e bloqueadores. Portanto, a variação do teor desses compostos confere propriedades físicas, químicas e mecânicas diferentes para cada material (CUNICO, 2013).

A fotopolimerização é o processo químico de transformação dos monômeros líquidos em um polímero sólido através de um feixe de luz UV. Quando o material possui fotoiniciador em sua composição, ele faz com que essa reação aconteça em cadeia, passando por três estágios: iniciação, propagação e terminação (HOLTRUP, 2015).

Segundo Rodrigues e Neumann (2003), na iniciação o fotoiniciador sofre uma excitação devido aos raios UV gerando um radical livre que irá reagir com o monômero para produzir as espécies iniciadoras da cadeia. A propagação envolve o crescimento linear da cadeia polimérica através da adição dos monômeros e fotoiniciadores presentes na resina. O processo termina quando duas cadeias que estão se propagando se encontram formando uma molécula ou reagem entre si formando duas cadeias sem radicais.

Portanto, a resina determina as propriedades do produto. Existe uma relação entre a espessura da camada e a composição da resina. Quanto mais bloqueador em sua composição, mais fina será a camada produzida. Quanto mais iniciador, mais rapidamente ocorre a reação, menor o peso molecular e menor a densidade de reticulação (HOLTRUP, 2015).

Por isso, algumas resinas da 3D Criar serão listadas a seguir a fim de ilustrar a diferença elas e o uso mais indicado (3D CRIAR, 2017).

- B9R-3-Emerald, resolução de 25-70 microns. Deixa um derretimento limpo e sem manchar o modelo, possibilitando fundir objetos mais grossos enquanto mantém excelente nível de detalhe.
- B9R-2-Black, resolução de 30-200 microns. Alta resistência e rápida cura para modelos duráveis, moldes vulcanizados ou derretíveis em investimentos duros. Alta variedade de velocidades e resoluções.
- B9R-4-Yellow, resolução de 20-50 microns. Mais alta tecnologia de resinas. Desenvolvida com foco em joalheiros por apresentar o menor nível de resíduos do mercado após derretimento. Não deixa cinzas e imprime com excelentes detalhes.
- B9R-1-Cherry, resolução de 30-50 microns. Resina pigmentada para fatiamento fino e detalhes afiados. Adequada para moldes vulcanizados.

2.2.2.4 Reservatório

Na impressora 3D SLA DLP, são comumente utilizados 2 modelos de tanque. O primeiro modelo possui a parte inferior preferencialmente de vidro como na Figura 18.



Figura 18: Exemplo de tanque de resina com fundo de vidro

Fonte: <https://pt.aliexpress.com/item/Funssor-CTC-SLA-3D-printer-SLA-light-curing-photosensitive-resin-tank-ctc-sla-resin-tray-for/32809646113.html> (2018)

Para evitar problemas com alta aderência, o fundo é revestido por um produto químico que se transforma em uma borracha de silicone, o PDMS (Figura 19). Este recurso é indicado principalmente para impressoras que possuem movimento *Tilting* (MAKERTECHLABS). No procedimento de preparação desta mistura, descrito por Zavorotnitsienko (2013), o PDMS deve ser misturado com um catalisador sendo que a proporção é de 10:1, ou seja, a cada 10g de PDMS é necessária 1g de catalisador. As

quantidades variam de acordo com o tamanho do tanque e a altura da película a ser formada.



Figura 19: Borracha de Silicone para Impressora 3D - PDMS

Fonte: <https://www.makortechlabs.com.br> (2018)

Depois de serem pesados, os produtos devem ser misturados por aproximadamente 15 minutos para que a mistura fique homogênea e não apresente falhas depois de solidificada. Após esta etapa, com o vidro limpo, o silicone deve ser depositado no fundo do tanque do centro para as bordas (Figura 20). As bolhas formadas no processo de mistura irão desaparecer e o silicone se acomodará igualmente no recipiente durante o repouso (ZAVOROTNITSIENKO, 2013).



Figura 20: Silicone sendo depositado no tanque de resina

Fonte: <http://www.ilios3d.com/en/iliosdocumentationpage/3912pdmspreparation> (2018)

Após cerca de uma hora, as bolhas já devem ter saído e o PDMS irá curar em até 72 horas. É recomendado que o tanque permaneça em repouso na própria impressora e preferencialmente tampado, para que não caia pó sobre a superfície do silicone (ZAVOROTNITSIENKO, 2013).

Com o tempo de uso, a camada de PDMS torna-se opaca e danificada devido ao contato excessivo da luz UV e da força de separação entre ela e a resina, comprometendo a qualidade e eficácia das peças impressas. O processo de remoção é

simples e rápido de forma que, com o auxílio de uma espátula, as extremidades são levantadas e o restante da película pode ser puxado. Além disso, a espessura da camada de silicone também interfere no processo e qualidade de impressão. Uma vez que o fundo da bacia é revestido com camadas mais grossas, a passagem da luz é comprometida e a radiação UV torna-se insuficiente para realizar a cura adequada da camada (HUANG e JIANG, 2005).

O outro modelo de reservatório, é um tanque modular que utiliza como fundo um filme termoplástico, Teflon FEP. Este tipo de dispositivo apresenta melhores resultados quando trabalham com resinas menos viscosas e atendem bem as impressoras que não possuem movimento de *Tilting*. A substituição do filme é prática e feita quando estiver danificado devido à força de separação das camadas (MAKERTECHLABS) (Figura 21).

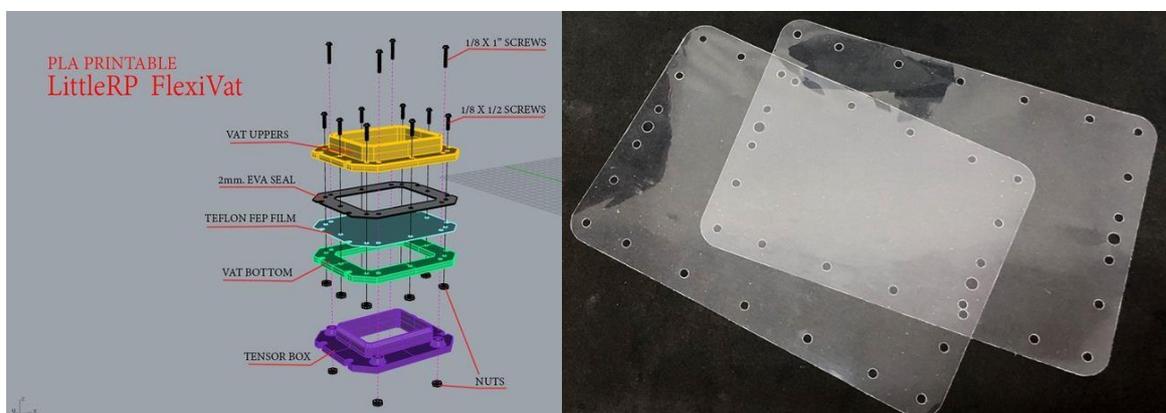


Figura 21: Exemplo de tanque de resina modular e folhas de Teflon

Fonte: [https://www.makertechlabs.com.br/filme-fep-teflon-0.125mm--\(0.005\)~10~15~6~filme-fep-teflon%C2%AE~filme-fep-teflon%C2%AE-para-flexvat](https://www.makertechlabs.com.br/filme-fep-teflon-0.125mm--(0.005)~10~15~6~filme-fep-teflon%C2%AE~filme-fep-teflon%C2%AE-para-flexvat) (2018)

2.2.3 Sistemas Embarcados

O sistema embarcado é um conjunto dedicado e especialista composto por hardware, software e periféricos, que basicamente possuem capacidade computacional dentro de um circuito integrado. É um sistema completo e independente que pode ter inúmeras aplicações, porém, possui capacidade de executar apenas uma determinada tarefa por vez. O usuário final não é capaz de acessar os programas embutidos no sistema, mas é possível interagir com o equipamento através de interfaces de acordo com o que o sistema foi projetado (CUNHA, 2007).

Ainda, segundo Cunha (2007), a estrutura básica deste tipo de sistema contém conversores AD e DA, CPU, memória e ambiente de programação (FPGA) como mostra

a Figura 22. Além disso, possuem baixo consumo energético, tamanho reduzido, valor acessível, baixo tempo de resposta, confiabilidade e segurança.

Este sistema pode ser encontrado, por exemplo, no setor automobilístico para o recebimento de informações vindas de centenas de sensores e tomada de decisões. Além desta, os sistemas embarcados podem ser utilizados para aquisição de dados diversos, sistemas de controle, processamento de sinais, comunicações, redes e uso geral que necessitam de interação entre usuário e o sistema (CHASE, 2007).

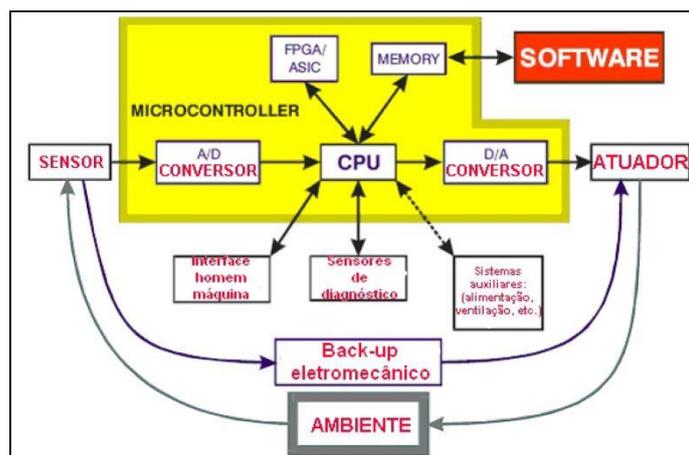


Figura 22: Elementos básicos de um Sistema Embarcado.

Fonte: Alessandro F. Cunha, 2007.

2.2.3.1 Raspberry Pi

O *Raspberry Pi* é uma placa para estudo e prototipagem de sistemas embarcados, desenvolvida em 2006 por Eben Upton, Rob Mullins, Jack Lang e Alan Mycroft, com o intuito de incentivar e aproximar jovens da área de Ciência da Computação. Lançado em 2012, este microcomputador já superava as expectativas do público por ser um dispositivo com tantas funcionalidades em uma placa tão pequena. Para o funcionamento do *Raspberry*, de acordo com a aplicação, é necessário o uso de um sistema operacional que realize o gerenciamento da plataforma e seus recursos, que neste caso é o *Raspbian* (RASPERRY PI, 2019).

A modelo da terceira geração deste dispositivo, *Raspberry Pi 3 Model B* (Figura 23), possui um processador Quad Core de 1.2GHz de 64 bits, que proporciona um alto desempenho, Wifi e Bluetooth 4.1 integrados, slot para cartão de memória SD e adaptador para microSD, que torna o dispositivo mais versátil. Ele dispõe ainda de 1GB de memória RAM, 4 portas USB 2.0, porta Ethernet, conector de vídeo HDMI, interfaces

para câmera e display, conector combinado de áudio e vídeo, GPIO de 40 pinos e entrada de energia (RASPBerry PI, 2019).



Figura 23: Raspberry Pi 3 Model B.

Fonte: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/> (2019)

2.2.3.2 Sistema Operacional

Devido ao grande uso e popularização do *Raspberry*, muitos sistemas operacionais baseados em Linux são oferecidos pela Fundação *Raspberry Pi* para o gerenciamento desta placa como o *Raspbian*, Ubuntu Mate, OSMC e Pidora por exemplo (LIMA, et.al. 2015).

O *Raspbian* é o sistema operacional padrão do *Raspberry* e recomendada pelo fabricante. Ele é baseado no Debian, uma das mais antigas distribuições Linux. Possui softwares para escritório, permite navegar na internet e possui diversas ferramentas de configuração do computador e de desenvolvimento. Ele oferece mais de 35000 pacotes .deb que são especificamente configurados para proporcionar o desempenho otimizado do *Raspberry Pi*, o que o torna um excelente sistema para quem deseja criar projetos (EBERMAM, 2017).

O Ubuntu Mate é um sistema operacional estável e fácil de usar pois possui um ambiente de desktop tradicional intuitivo e personalizável. Ele inclui um gerenciador de arquivos que pode conectá-lo aos seus arquivos locais e de rede, editor de texto, calculadora, visualizados de imagens e documentos, entre outros. Este sistema requer hardwares modestos pois necessita de poucos recursos, o que o torna um sistema adequando para estações de trabalho modernas (UBUNTU MATE, 2018).

Já o OSMC (Open Source Media Center) é um reprodutor de mídia livre baseado em Linux que oferece ao sistema embarcado acesso a canais via Internet e diversos recursos que permitem a reprodução de áudio e vídeo com qualidade (OSMC, 2018).

Por fim, o sistema Pidora é proveniente da distribuição Linux Fedora e foi desenvolvido para obter melhor aproveitamento do hardware *Raspberry Pi*. Ele foi compilado especificamente para esta plataforma e possui um ambiente simples e sem muitos recursos gráficos como efeitos e animações (LIMA, 2015).

2.2.3.3 OctoPrint

O OctoPrint (Figura 24) é uma interface da web que serve para controlar e monitorar todos os aspectos relacionados às impressoras 3D do próprio navegador. Ele cria um servidor local a partir do qual todos os serviços são iniciados para controlar a máquina. É possível incorporar à impressora uma Webcam e assistir remotamente o que está sendo impresso em tempo real, acompanhar o progresso da impressão através do visualizador do GCode integrado além de permitir a movimentação dos eixos da impressora (OCTOPRINT, 2019).

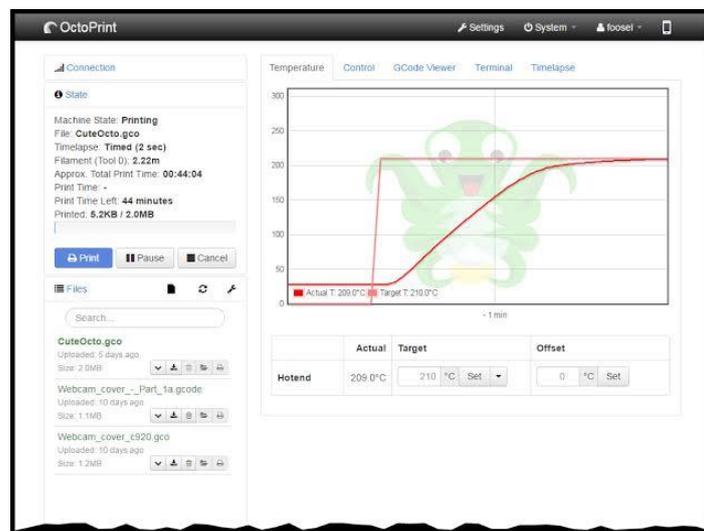


Figura 24: Interface de controle de temperatura do OctoPrint.

Fonte: <https://octoprint.org/> (2019).

3. Desenvolvimento

Como proposto, este trabalho iniciou com o estudo do projeto de Medeiros (2017) e das bibliografias que tratam do funcionamento e características específicas das Impressoras 3D de estereolitografia por Projeção de Máscara, baseadas em tecnologia DLP.

A impressora de Medeiros (2017) foi construída na configuração *Bottom-Up* e seu método de separação de camadas é o *Tilting*. Sua resolução no eixo Z é de 50 microns, cujo controle é feito através de um motor de passo. Em X e Y, a resolução é dada a partir das configurações do projetor utilizado. Para esta máquina não foi utilizado um dispositivo específico para esta aplicação, portanto, buscou-se um projetor comercial DLP que possuísse alta resolução (1920x1080 pixels) e projeção de raios UV devido à viabilidade e custo do mesmo. A plataforma de construção da impressora foi feita de alumínio e o tanque de resina, de acrílico e vidro borossilicato sendo o revestimento do fundo de PDMS. Além disso, a máquina conta com um sensor de fim de curso cuja finalidade é garantir a segurança da mesma, limitando a movimentação do eixo Z.

Foram estudados ainda as principais limitações e os parâmetros do processo que interferem diretamente na qualidade das peças impressas. Concomitante a este estudo, submeteu-se a impressora a uma série de testes com o intuito de identificar melhor os problemas presentes na mesma.

Durante a realização dos testes, a peça plástica que faz parte do mecanismo do *Tilting*, encaixada sob pressão ao eixo do motor, apresentou baixa resistência (Figura 25). Ao inclinar o tanque de resina para separar a camada curada, devido à força de separação, o motor exercia um alto torque. A peça, por não estar travada, não transmitia o movimento de forma que, passado o tempo determinado para o movimento do *Tilting*, o tanque de resina apresentava um pequeno desnivelamento.

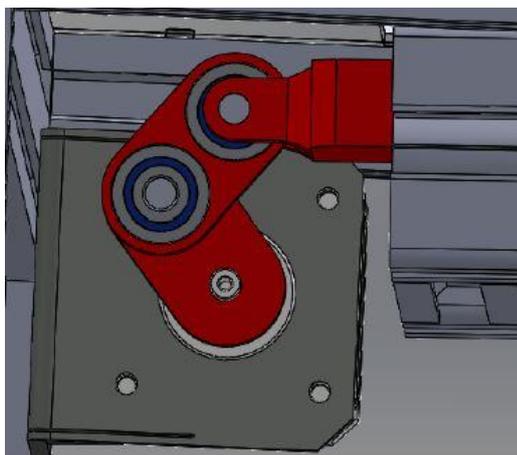


Figura 25: Representação do mecanismo do Tilting

Fonte: Relatório de TCC de Medeiros – 2017

Com o intuito de tornar o sistema mais robusto, optou-se então por construir o modelo de tanque de resina modular com filme de teflon, que dispensa o uso do mecanismo do *Tilting*. Dessa forma, reduz-se a chance de desnível da bacia que pode ser provocado pelo desgaste da peça plástica.

Outro fator que reforçou a troca do modelo do tanque foi o aspecto em que se encontrava o fundo do mesmo. A camada de PDMS da bacia encontrava-se opaca e com desgastes provocados por adesão excessiva de testes anteriores como mostra a Figura 26.

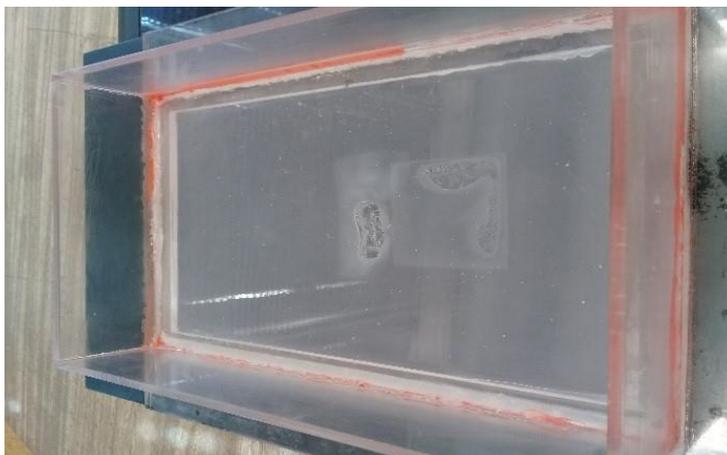


Figura 26: Tanque de resina com fundo revestido de PDMS.

Fonte: Elaborada pelo Autor.

De acordo com o as informações da seção 2.2.2.4, a passagem de radiação UV através da bacia fica limitada, comprometendo a qualidade das peças impressas. Por isso, foi desenvolvido um novo modelo de tanque de resina modular com o fundo de

Teflon composto por duas partes, sendo uma maior para as paredes (Figuras 27 e 28) e uma menor para encaixe e tensão do filme de Teflon (Figura 29).

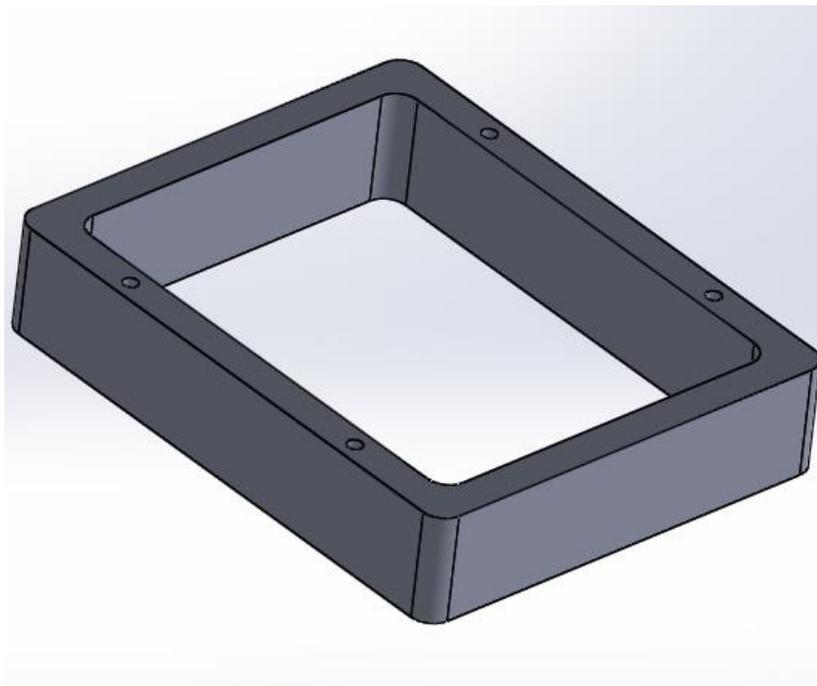


Figura 27: Vista da parte superior do Tanque de Resina

Fonte: Elaborada pelo Autor.

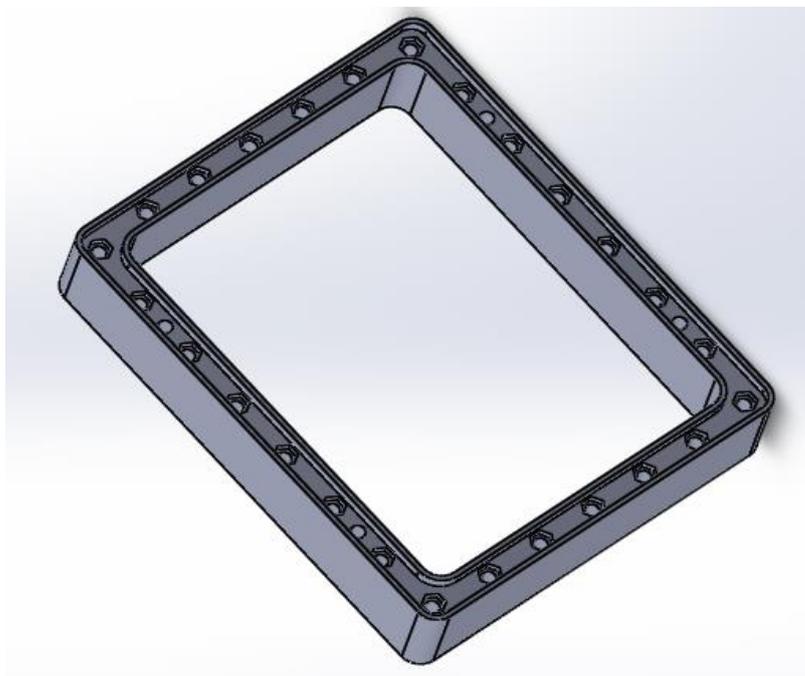


Figura 28: Vista da parte inferior do Tanque de Resina.

Fonte: Elaborada pelo Autor.

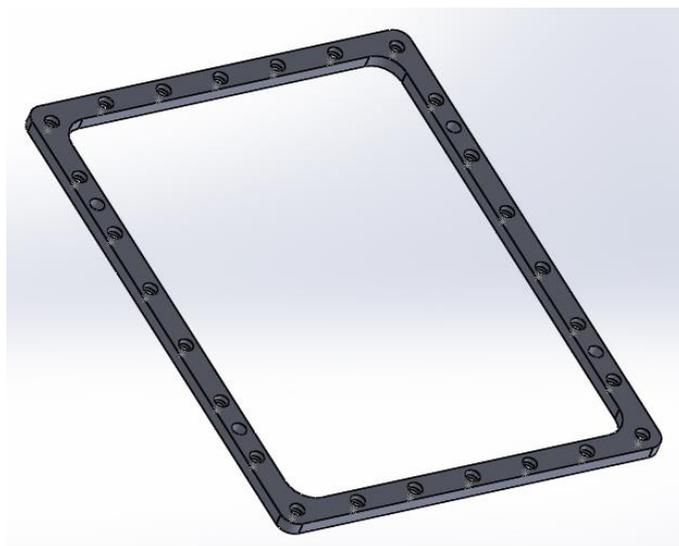


Figura 29: Peça de encaixe do fundo do Tanque de Resina.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Durante a realização de um novo teste, a impressora deixou de aderir as camadas à plataforma de construção. Então foram feitas algumas observações durante os experimentos a fim de identificar as possíveis causas. Com isso, algumas hipóteses foram levantadas:

- 1) Tempo de projeção da luz UV insuficiente para a cura da camada;
- 2) Limpeza da plataforma e do tanque de resina com materiais inapropriados;
- 3) Perda das propriedades químicas da resina;
- 4) Cobertura de PDMS do fundo do tanque de resina desgastado e limitando a passagem de luz;
- 5) Suporte do tanque de resina e plataforma de construção desnivelados;
- 6) Plataforma de construção com a superfície muito lisa;

Após esse levantamento, algumas hipóteses foram testadas. Primeiramente, realizou-se a limpeza da plataforma de construção e da bacia com álcool isopropílico, visto que é um produto não tóxico e não corrosivo devido ao baixo percentual de água em sua composição.

A próxima suposição a ser testada foi o tempo de projeção da luz UV. Nesta etapa, o experimento foi realizado para 30 s, 40 s, 50 s, 60 s e 70 s. Tais valores foram definidos empiricamente, uma vez que a resina não apresentava cura com o tempo de 30s, foram sendo acrescentados 10s no tempo de exposição a cada teste.

Em relação ao revestimento de PDMS do reservatório, foi realizado um teste simples de projeção e uma análise visual de suas condições atuais.

A quinta hipótese foi verificada com o auxílio de um nível a fim de constatar se existe uma inclinação do suporte da bacia e na plataforma.

Quanto a plataforma de construção, foram depositadas pequenas quantidades de resina diretamente em sua superfície e expostas à luz do sol.

Para o projeto da nova plataforma, levou-se em consideração o seu peso, a quantidade de partes que a compõe e os materiais utilizados (Figura 30).

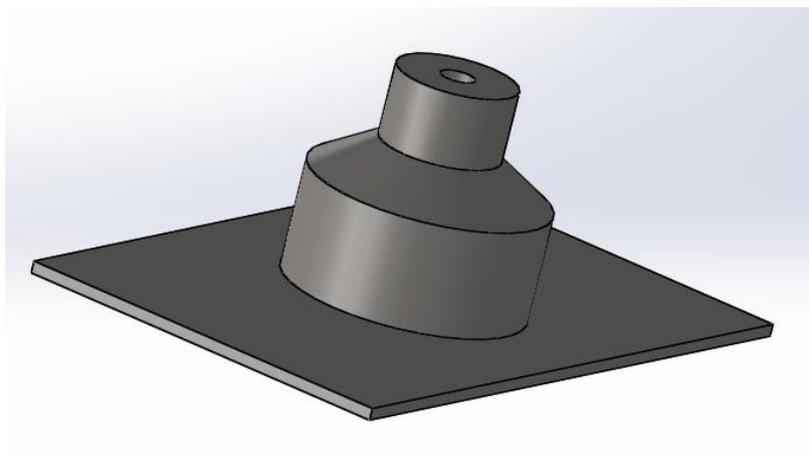


Figura 30: Projeto da nova plataforma de construção.

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Após a finalização das novas peças da impressora, a máquina foi ajustada e os testes foram retomados. Foi testado ainda, o sensor de fim de curso a fim de verificar o seu funcionamento.

Para o desenvolvimento da interface com o usuário, primeiramente foi realizada a instalação do sistema operacional *Raspbian* na placa do Raspberry Pi. Em seguida, para a instalação e configuração do OctoPrint, foi necessário a utilização de outros aplicativos como suporte para formatação e depois para a escrita do programa no cartão de memória. Após instalada a interface, o *sd card* é inserido no Raspberry, já conectado à impressora, para que sejam realizados os ajustes das telas do programa.

4. Resultados e Discussões

Através das referências bibliográficas consultadas, foi possível compreender o funcionamento da máquina e identificar suas limitações.

Os principais parâmetros a serem considerados para obter uma impressão de qualidade são o projetor e a resina. O primeiro deve possuir alta taxa de transferência de luminosidade, alto contraste e alta resolução do chip DMD. Atualmente no mercado, a maior resolução disponível para esse chip é de 3840x2160 pixels, a mesma de aparelhos de TV e projetores 4K ultra HD. Já o segundo deve ser escolhido de acordo com a aplicação desejada, uma vez que os compostos químicos de cada resina variam.

Após definidos o projetor e a resina, deve-se ajustar o tempo de exposição à luz de acordo com a espessura da camada desejada e o material escolhido. Tais medidas devem ser acertadas para garantir que não haverá sobre-cura ou irradiação insuficiente, garantindo a qualidade dos detalhes e das dimensões do modelo. Ainda nesse contexto, o tratamento de pós processo é de suma importância para a retirada dos resquícios de material não curado e posteriormente para a finalização da cura total da peça, evitando possíveis contrações dimensionais.

O primeiro teste, utilizando a resina vermelha VM-300 da *Makertech Labs*, foi realizado a fim de constatar as condições em que a máquina se encontrava. Durante a impressão, verificou-se que as novas camadas não estavam aderindo à peça e a mesma foi interrompida. O resultado é apresentado na Figura 31.



Figura 31: Primeiro teste realizado na impressora. Escala 2,5:1.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

No segundo teste foi possível imprimir algumas camadas de um protótipo pequeno cuja base mede 2cm x 3cm aproximadamente (Figura 32). Aqui, devido à alta adesão

entre as camadas e o fundo da bacia, a impressão foi interrompida, pois logo no início apresentou deformações. Notou-se ainda que as camadas não estavam bem aderidas à plataforma e apresentavam bolhas e uma cura irregular.



Figura 32: Peça obtida no segundo teste realizado na impressora. Escala 2:1.

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Após verificar a não aderência das peças à plataforma de construção, as hipóteses foram testadas. No que diz respeito a limpeza da plataforma com o álcool isopropílico e os diferentes tempos de cura aos quais a resina foi submetida, as camadas continuaram não aderindo. A resina foi exposta à luz UV por 30, 40, 50, 60 e 70s. Apenas para este último foi possível observar a polimerização do material. Com isso, constatou-se a degradação e perda das propriedades químicas da resina o que confirmou a terceira hipótese levantada. Portanto, uma nova foi adquirida (Figura 33).



Figura 33: Resina DM-300 para Flashforge Hunter.

Fonte: <https://www.makertechlabs.com.br/Resina-DM-300-para-Flashforge-Hunter~35~24~3~Resinas-por-Impressora~DLP---B9-Creator> (2019).

A VM-300 encontrava-se indisponível para compra. Em contato com o suporte do fornecedor, verificou-se que houve problemas com o lote desta resina e a mesma

precisou ser retirada do mercado. Sugeriu-se então a DM-300, compatível com a anterior.

Devido à condição do silicone que reveste o fundo do tanque de resina, que compromete a passagem de radiação UV, e visando praticidade na sua manutenção, um novo reservatório foi construído. Optou-se por imprimi-lo em uma impressora 3D FDM em razão da sua geometria, economia de material e à rápida fabricação. O resultado pode ser observado nas Figuras 34 e 35.

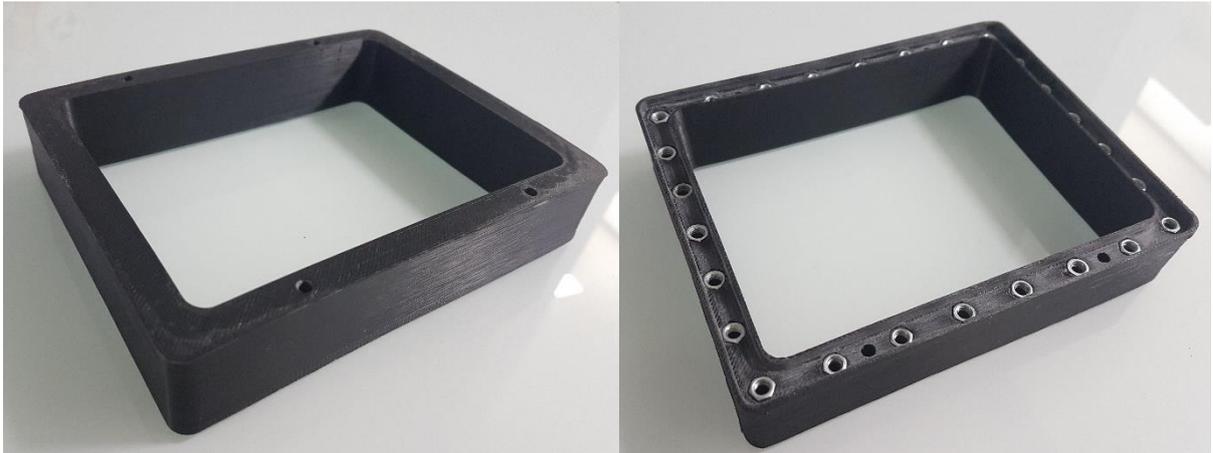


Figura 34: Tanque de Resina.

Fonte: Elaborada pelo Autor.

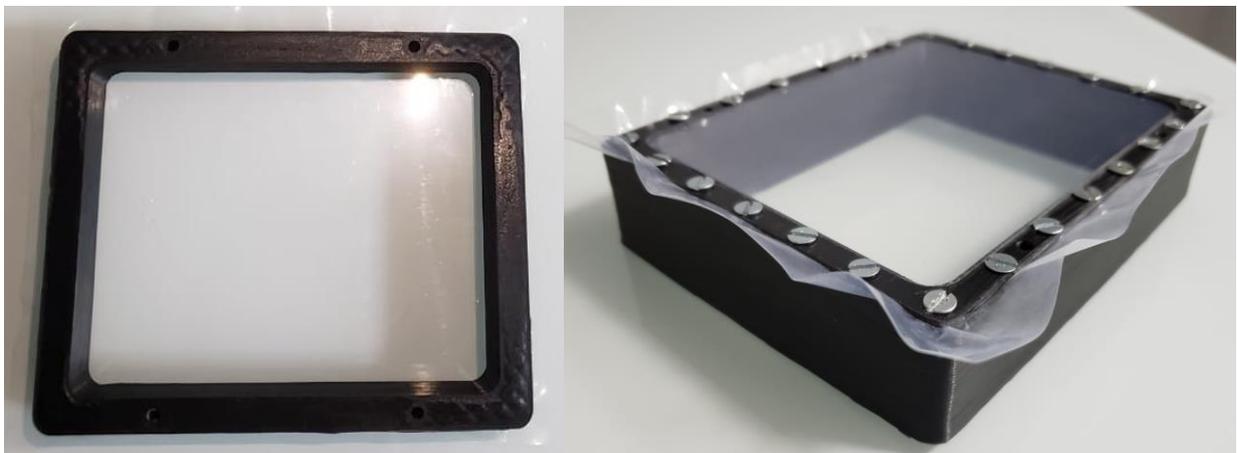


Figura 35: Tanque de Resina com o filme de Teflon.

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Com relação ao desnível, foi constatada uma inclinação apenas da plataforma de construção devido aos parafusos ajustáveis que unem a base ao suporte que é fixado à impressora, como mostra a Figura 36.



Figura 36: Verificação do desnível da plataforma.

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Visando minimizar os erros oriundos da estrutura mecânica, uma vez que é de suma importância garantir o nivelamento da plataforma para a construção perfeita das camadas, desenvolveu-se um projeto mais robusto.

Para a nova plataforma, optou-se por construí-la com duas partes, sendo a primeira, uma chapa de aço de inox de dimensões 115 x 70 mm² e a segunda, uma peça de nylon com diâmetro maior e menor de 60mm e 30mm respectivamente e altura de 60mm conforme Figura 36.



Figura 37: Nova plataforma de construção. Escala 1:2.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Em relação a plataforma anterior, obteve-se uma redução de 45% do seu peso passando de 735g para 404g. Dessa forma reduziu-se também o esforço realizado pelo motor para movimentar a estrutura ao longo do eixo Z. Além disso, a área de impressão foi reduzida, uma vez que o projetor emite um feixe de luz difuso e a concentração de

UV nas extremidades é mais fraca quando comparada ao centro, fazendo-se desnecessário medidas maiores.

No primeiro teste realizado após a montagem das novas peças e ajuste de alguns parâmetros, foram analisados no modelo as suas dimensões e acabamento superficial como mostra a Figura 38. A impressão foi realizada em 600 camadas com espessura de 0,05mm, tempo de exposição de 70s para as três primeiras camadas e 25s para as demais totalizando 4 horas 59 minutos e 54 segundos. Tais configurações se devem ao resultado atingido no último teste com a antiga resina.

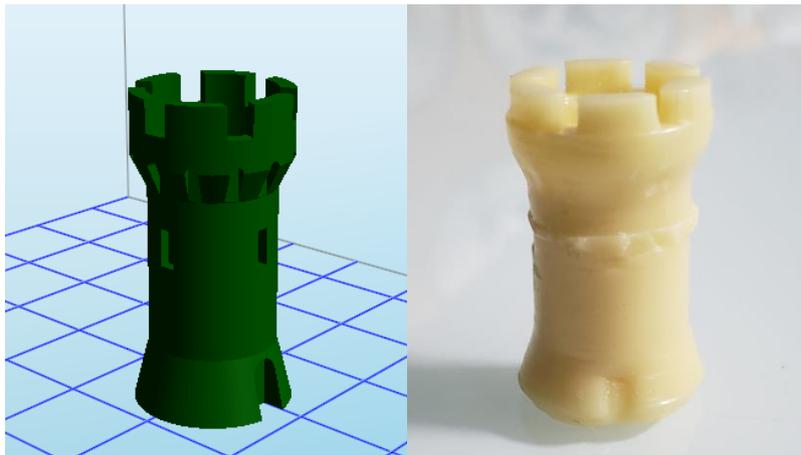


Figura 38: Modelo 3D no software Creation Workshop e ao lado a peça impressa. Escala 1:1.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

O modelo 3D possui 15mm de diâmetro de base e 30mm de altura. Foram conferidas as medidas da peça impressa e a mesma apresentou uma variação de 3mm na base e 1mm na altura sendo suas dimensões finais, após a lavagem da peça com álcool isopropílico e o tratamento de pós cura no sol, 18mm e 31mm respectivamente. Tal variação dimensional se deve a um alto tempo de exposição das camadas à luz UV, provocando sobre-cura do material, o que levou também a baixa qualidade dos detalhes. Portanto, verificou-se que essa configuração não é a mais adequada para a resina DM-300, fazendo-se necessária a calibração da impressora através de novos testes.

Para realizar o ajuste do tempo de projeção, foi necessário o uso de um calibrador. O modelo escolhido foi o desenvolvido pela EZY3D, empresa brasileira especializada em impressoras 3D DLP LCD UV, e consiste em duas peças, sendo uma maior em formato hexagonal, com cinco cavidades pentagonais numeradas, e, outra menor que deverá se encaixar em um desses espaços (Figura 39).



1. Aumentar 1s
2. Aumentar 0,5s
3. Calibração ok!
4. Diminuir 0,5s
5. Diminuir 1s

Figura 39: Calibrador de resina EZY3D.

Fonte: EZY3D Printing, 2019.

O primeiro calibrador foi impresso mantendo as configurações da máquina a fim de avaliar o comportamento dos parâmetros para este modelo, o resultado obtido pode ser verificado na Figura 40.



Figura 40: Primeiro teste de impressão do calibrador. Escala 1,5:1.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Verificou-se que o tempo de exposição para essa resina está excessivamente alto, uma vez que houve uma sobre-cura de material. Portanto, optou-se por reduzir a projeção de camadas para aproximadamente $\frac{1}{4}$ do tempo, cerca de 6 segundos, e realizar uma nova impressão (Figura 41).

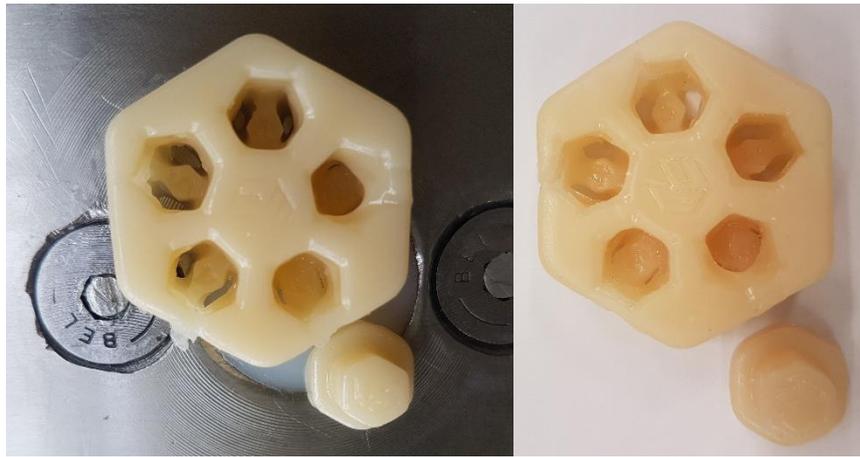


Figura 41: Segundo teste de impressão do calibrador. Escala 1,5:1.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Uma vez que a peça apresentou detalhes e uma forma próxima à desejada, os testes posteriores a esse foram realizados com pequenas alterações nos parâmetros. Foi observado que o lado esquerdo da peça apresentou um nível maior de detalhes enquanto o direito, localizado no centro da plataforma, obteve uma pequena sobre-cura. Tal efeito, é resultado do feixe de luz UV difuso do projetor que leva à cura desigual da resina. Por isso, tendo em vista obter a uniformidade das camadas, o calibrador foi reposicionado na plataforma e uma nova impressão foi realizada (Figura 42).

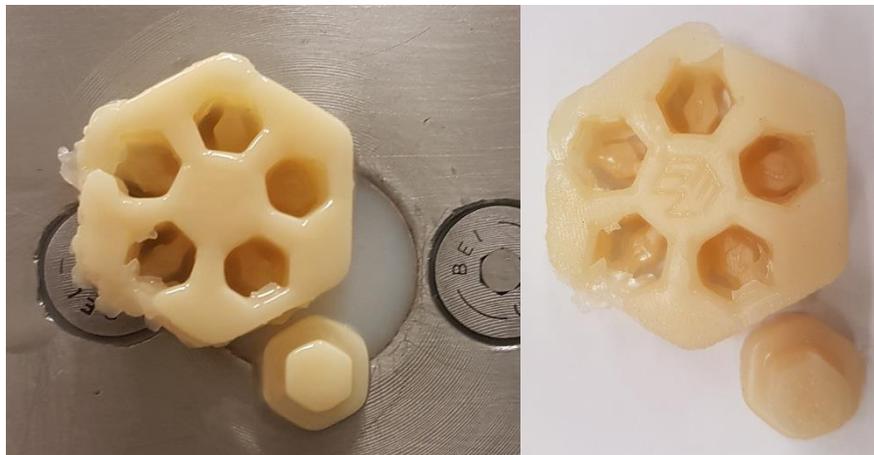


Figura 42: Terceiro teste de impressão do calibrador. Escala 1,5:1.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

O terceiro calibrador impresso reforça a irregularidade do feixe emitido pelo projetor. Nesse caso, as extremidades do lado esquerdo das camadas não absorveram radiação UV suficiente, de tal forma que a lateral da peça não se formou. Porém, neste teste o pino encaixou na cavidade de número 5, que indica que o tempo de projeção deve ser reduzido em 1 segundo para cada camada.

Feito isso, a torre foi novamente impressa a fim de verificar sua qualidade após as configurações propostas pelo calibrador. No entanto, o resultado obtido não foi o esperado. A peça apresentou um acúmulo de camadas em sua base conferindo a ela 18mm de diâmetro e seu comprimento ao longo do eixo z foi reduzido para 25mm conforme mostra a Figura 43.



Figura 43: Torre impressa após a calibração. Escala 1,5:1.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com o intuito de verificar se o tempo de cura estava insuficiente para a construção da peça no seu tamanho original, o mesmo foi alterado para 24s por camada (1s a menos que o utilizado para a primeira torre). Porém, o problema persistiu e a nova impressão pode ser observada na Figura 44, agora com 23mm de altura e cerca de 17mm de diâmetro de base. No decorrer do teste, percebeu-se alguns estalos durante o processo de construção que indicam um problema mecânico relacionado ao eixo z.



Figura 44: Resultado do novo teste para tempo de cura de 24s. Escala 1,5:1.

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Ainda, no que diz respeito ao acabamento superficial e precisão dos modelos impressos, o projetor da máquina apresenta uma limitação quando ao foco da luz. O dispositivo foi calibrado conforme orientações do fabricante e os ajustes necessários nas lentes também foram feitos. Porém, conforme mostra a Figura 45, a imagem projetada mostra uma imagem secundária com uma intensidade de luz mais suave, mas que ainda assim pode gerar erros na impressão.



Figura 45: Imagem desfocada fornecida pelo projetor. Escala 1,5:1.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após a instalação e configuração do OctoPrint, a interface de comunicação desenvolvida é mostrada na Figura 46. A conexão remota com a impressora é feita através do IP gerado pelo *Raspberry*, desde que o computador e a placa estejam conectados à mesma rede *wi-fi*.

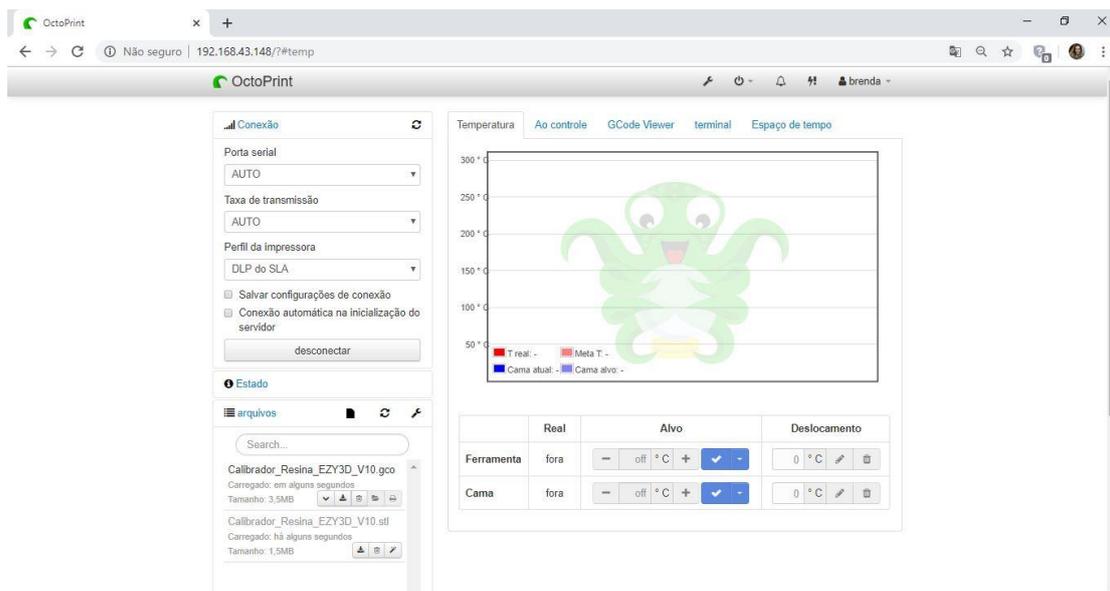


Figura 46: Tela inicial do OctoPrint conectada a impressora.

Fonte: Elaborada pelo Autor

Através do OctoPrint, é possível carregar o arquivo do modelo 3D no formato *stl* diretamente para o software da interface. O mesmo realiza o fatiamento da peça e gera o código G para a impressão além de permitir controlar manualmente a movimentação do eixo Z. Ele mostra, ainda, o andamento do processo e a camada que está sendo impressa em tempo real, inclusive através de uma Webcam acoplada à máquina.

Entretanto, como a impressora foi criada por Medeiros (2017) as configurações necessárias para comunicação com a interface não são padronizadas, a mesma não possui seu nome e modelo listado pelo *software*. Após diversas tentativas de comunicação, a conexão não funcionou.

5. Conclusões e Perspectivas

Tendo em vista a metodologia adotada, os estudos bibliográficos, testes e análise e solução de problemas, é possível concluir que os objetivos propostos foram parcialmente concluídos. O estudo aprofundado da tecnologia e as modificações realizadas proporcionaram um resultado satisfatório que foi a impressão de uma peça, dado que a impressora deixou de funcionar no início deste projeto. Entretanto, a interface com o usuário gerou problemas de comunicação não podendo ser implementada.

Porém, ao longo do desenvolvimento deste trabalho foram encontradas algumas limitações. Uma delas foi a escolha dos materiais para a construção da plataforma e do tanque de resina. Para ambas, era necessário que as peças fabricadas fossem leves, resistentes mecanicamente e à corrosão. Devido ao alto custo de um material com essas características, construiu-se a plataforma com elementos reaproveitados e o tanque de resina, também devido à sua geometria, foi impresso em uma impressora 3D de filamento.

Outra restrição identificada foi o projetor da máquina. Apesar de ser o mais adequado dentre os equipamentos disponíveis no mercado, ele não foi desenvolvido para essa aplicação. O processo de impressão por estereolitografia, requer uma projeção de camadas perfeitas, sem distorções, o que não é obtido com o dispositivo em questão. Desta forma, a qualidade das peças impressas fica comprometida.

Com a implementação da interface com o usuário através do OctoPrint e do *Raspberry*, seria possível tornar a impressora uma máquina mais compacta, uma vez que o computador não ficaria conectado diretamente a mesma. Tal ação eliminaria os riscos de danos causados a este dispositivo devido ao contato com a resina. Essa aplicação poderá ser solucionada no futuro.

Além da mecânica e computação, outras áreas foram envolvidas ao longo deste trabalho como a química e a física, para compreensão dos fenômenos de aderência, força de separação e fotopolimerização da resina. Portanto, boa parte do tempo foi dedicada a esse estudo, visto que os principais problemas e limitações da impressora eram provenientes desses.

Algumas melhorias e alterações podem ser sugeridas como trabalhos futuros com o objetivo de alcançar melhores resultados, principalmente para otimização da impressão, melhoria das peças e interface com o usuário. Dentre as quais pode-se citar:

- Fabricação de um tanque de resina em material mais resistente;
- Avaliação de melhorias para o processo de pós-cura;
- Desenvolvimento de uma câmara UV para o processo de pós-cura;
- Utilização de um projetor específico para impressão em estereolitografia;
- Implementação da interface com usuário específica para essa impressora e;
- Verificação do problema mecânico identificado nos últimos testes.

Por fim, o trabalho apresentado teve como propósito aprimorar a impressora 3D de estereolitografia por projeção de máscara baseada em tecnologia DLP desenvolvida por Medeiros (2017), a fim de minimizar os erros no processo de impressão e garantir maior qualidade das peças produzidas pela máquina. O objetivo principal foi alcançado, obtendo uma nova peça impressa com as melhorias adotadas. Entretanto, ficou clara, durante o desenvolvimento do trabalho, a dificuldade de se estudar os diversos processos que influenciam na impressão 3D por estereolitografia, os desafios existentes e a necessidade de avanços nessa área.

Bibliografia

- [1] 3D SYSTEMS. **Nossa História**. Disponível em: <<https://br.3dsystems.com/our-story>> Acesso em: 03 mai. 2018.
- [2] AGUIRRE, Luis Antonio. **Fundamentos de Instrumentação**. São Paulo, Pearson Education do Brasil, 2013.
- [3] BÁRTOLO, P. J. **Stereolithography - Materials, Processes and Applications**. Polytechnic Institute of Leiria, 2011.
- [4] BEAL, V. E. **Avaliação do uso de insertos obtidos por estereolitografia na moldagem de pós metálicos por injeção**. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Santa Catarina, 2002.
- [5] BIKERMAN, J. J. **The Science of Adhesive Joints**. Academic Press, New York, 1961.
- [6] BRAGA, Anísio Rogério; BRAGA, Carmela Maria Polito. **Notas de Aula de Instrumentação Industrial**. Belo Horizonte – MG. Disponível em: http://www.cpdee.ufmg.br/~palhares/Instrumentacao_NotasAula.pdf> Acesso em: 22 mai. 2018.
- [7] BRUUS, H. **Theoretical Microfluidics**. Oxford University Press, Oxford, 2008.
- [8] CAMPOS, Vicente F. **TQC: Controle da Qualidade Total: no Estilo Japonês**, Belo Horizonte: Falconi, 1992.
- [9] CANOSSA, Sérgio. **MASP – Método de Análise e Solução de Problemas**, São Paulo: Sercan, 2011.
- [10] CARDOSO, Amanda T. et al. **O ciclo PDCA para melhoria da qualidade dos serviços de consulta em uma unidade de saúde de Belém do Pará**. Belém – PA, 2010.
- [11] CÉZAR, Igor Ednardo Santos. **Avaliação do posicionamento do canal mandibular em protótipos biomédicos estereolitográficos**. Escola Bahiana de Medicina e Saúde Pública, Salvador, 2013.
- [12] CHASE, Otavio. **Sistemas Embarcados**. 2007. Disponível em: <www.sbajovem.org> Acesso em: 29 mai. 2018.

- [13] CHOCKALINGAM, K. *et.al.* **Establishment of process model for part strength in stereolithography.** Journal of Materials Processing Technology, 2008.
- [14] COELHO, Arthur Wilson Fonseca. **Estudo do Processo e da Qualidade de Peças Fabricadas por Estereolitografia.** UFRJ/ Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2016.
- [15] COSTA, Marcos Paulo da. **Processo de Estereolitografia (SLA) no auxílio do design de veículos automotivos.** São Caetano do Sul, 2012.
- [16] CUNHA, Alessandro F. **Sistemas Embarcados.** Editora Saber, Brasil, 2007.
- [17] CUNICO, M. W. M. **Desenvolvimento de nova tecnologia de manufatura aditiva baseado em formatação seletiva de compósito.** Tese de doutorado, 2013.
- [18] DEMING, EDWARDS W. **Qualidade: a revolução na produtividade.** Rio de Janeiro, Marques Saraiva. 1990.
- [19] EBERMAM, Elivelto. *et al.* **Programação para leigos com Raspberry Pi.** João Pessoa, PB. Editora IFPB, 2017.
- [20] EMAMI, M. M., BARAZANDEH, F., YAGHMAIE, F. **Scanning-projection based stereolithography. Method and structure.** Sensors and Actuators, 2014.
- [21] **FILIFELOP.** Disponível em: < <https://www.filipeflop.com/produto/sensor-de-distancia-ultrassonico-hc-sr04/>> Acesso em: 22 mai. 2018.
- [22] FINNES, Tyler. **High Definition 3D Printing – Comparing SLA and FDM Printing Technologies.** The Journal of Undergraduate, 2015.
- [23] GASPARIN, A. L. **Adesão metal-polímero: Dispositivos de medição e correlações físicoquímicas.** Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre-RS, 2011.
- [24] GROOVER, Mikell P. **Introdução aos Processo de Fabricação.** 1 ed., LTC, 2014.
- [25] GUIMARÃES, D. J. B. A. **Cavidades Moldantes Produzidas por Estereolitografia.** Dissertação de mestrado, Universidade do Minho, Portugal, 2006.
- [26] HIROWATARI, K.; IKUTA, K. **Real three dimensional micro fabrication using stereo lithography and metal molding.** Proceedings IEEE Micro Electro Mechanical Systems, Fort Lauderdale, FL, 1993.
- [27] HOLTRUP, R. **Design and Construction of a multi-material 3D DLP printer.** Final Bachelor Assignment. University of Twente, 2015.

- [28] HOLZER, F.; FADEL, G. **Design of a 3-degrees of freedom platform for the stereolithography apparatus**. Rapid Prototyping Journal, 2002.
- [29] HUANG, Y.M., JIANG, C.P. **On-line force monitoring of platform ascending rapid prototyping system**. Journal of Materials Processing Technology, 2005.
- [30] IBRAHIM, Afizah; SA'UDE, N; IMBRAHIM, Mustaffa. **Optimization of Process Parameter for Digital Light Processing (DLP) 3d Printing**. Johor, Malaysia, 2017.
- [31] KATAL, G., TYAGI, N., JOSHI, A. **Digital Light Processing and its Future Applications**. International Journal of Scientific and Research Publications, 2013.
- [32] KIM, Soo-Yeon. *et.al.* **Precision and trueness of dental models manufactured with different 3-dimensional printing techniques**. Seoul, Korea, 2018.
- [33] KIM, Yeong-Heum; KIM, Kyu-Eon; LEE, Chibum. **Accuracy Improvement of Output in Projection Stereolithography by Optimizing Projection Resolution**. Seoul, Korea, 2015.
- [34] KUME, H. **Métodos Estatísticos para Melhoria da Qualidade**. São Paulo: Gente, 1993.
- [35] LEONG, Kah Fai. *et.al.* **Abrasive jet deburring of jewellery models built by stereolithography apparatus (SLA)**. Journal of Materials Processing Technology. Elsevier BV, 1998.
- [36] LIMA, Victor G. S., *et.al.* **Análises de Sistemas Operacionais Linux usando Plataforma Embarcada**. Sergipe, 2015.
- [37] MEDEIROS, P. A.: **Projeto e Construção de uma Impressora 3D de Estereolitografia por Projeção de Máscara baseada na Tecnologia DLP**. Monografia de TCC, 2017.
- [38] **METALTEX**. Disponível em: < <http://www.metaltex.com.br/downloads/FM7.pdf>> Acesso em: 22 mai. 2018.
- [39] **MAKERTECHLABS**. Disponível em: <<https://www.makertechlabs.com.br/default.asp>> Acesso em: 13 mai. 2018.
- [40] MILIOLI, Larissa. **O uso de sistemas CAD e de prototipagem rápida no projeto de arquitetura: benefícios e desafios**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)—Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

- [41] NIZAM, A. *et.al.* **Dimensional Accuracy of the Skull Models Produced by Rapid Prototyping Technology Using Stereolithography Apparatus.** Malaysia, 2006.
- [42] **OCTOPRINT.** Disponível em: <<https://octoprint.org/>> Acesso em 12 nov. 2019.
- [43] OSMC. **About.** Disponível em: <<https://osmc.tv/about/>> Acesso em: 17 jun. 2018.
- [44] PAN, Y. *et.al.* **Study of separation force in constrained surface projection stereolithography.** Rapid Prototyping Journal, 2017.
- [45] PACKHAM, E. D. **Handbook of Adhesion**, 2. ed. Bath, United Kindon., John Wiley & Sons, 2005.
- [46] POMERANTZ, J. Cohen-Sabban. *et.al.* **Three dimensional modelling apparatus.** US Patent 4961154, 1990.
- [47] PERIARD, Gustavo. **O que é 5W5H e como ele é utilizado.** Disponível em www.sobreadministracao.com.br. Acesso em 08 mai. 2018.
- [48] PETRIE, E.W. **Handbook of Adhesives and Sealants**, 1. ed. New York, N.Y., McGraw-Hill, 2000.
- [49] PHAM, D.T.; DIMOV, S.S; GAULT, R.S. **Part orientation in stereolithography.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1999.
- [50] PRADO, Valmir Rodrigues. **Uso de Prototipagem Rápida em Medicina: Aplicação a Neurocirurgia.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- [51] **RASPBERRY PI.** Disponível em: < <https://www.raspberrypi.org/>> Acesso em:15 jun. 2018.
- [52] RIBEIRO, P.H.; FRANCO, H.C.; FREITAS, P.O. **Análise e aplicabilidade de uma máquina de fixação da coluna de direção na indústria automotiva.** Resende, 2015.
- [53] **ROBOCORE.** Disponível em: < https://www.robocore.net/loja/produtos/sensor-de-distancia-infra-vermelho-sharp-4-30cm.html#inf_tecnicas> Acesso em:21 mai. 2018.
- [54] RODRIGUES, M. R., NEUMANNI, M. G. **Fotopolimerização: Princípios e Métodos, Polímeros.** Ciência e Tecnologia, 2003.

- [55] SCHMERSAL. **Sensores Capacitivos**. Disponível em:<http://www.schmersal.com.br/fileadmin/download/global/br/catalogos_automacao/sensores_capacitativos_indutivos.pdf> Acesso em: 22 mai. 2018.
- [56] SILVA, Jorge Ribeiro Cunha da. **Método de concepção de articulações flexíveis em impressoras 3D**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2014.
- [57] SILVA, L. F. M.; MAGALHÃES, A. G.; MOURA, M. F. S. F. **Juntas adesivas estruturais**. Coimbra, Portugal: Publindústria, 2007.
- [58] SYAO, K., **Stereolithography apparatus**, U.S. Patent Application 14/454,901, filed August 8, 2014.
- [59] THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. **Sensores Industriais – Fundamentos e Aplicações**. 5ª ed. São Paulo: Érica, 2005.
- [60] UBUNTU MATE. **About**. Disponível em: <<https://ubuntu-mate.org/about/>> Acesso em: 17 jun. 2018.
- [61] VOLPATO, N., Ed. **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações**. EDGARD BLUCHER, 1ª edição, 2007.
- [62] WANG, W., CHEAH, C., FUH, J., et al. **Influence of process parameters on stereolithography part shrinkage**. Materials and Design, v. 17, n. 4, pp. 205 213, 1996.
- [63] WONG, K. V., HERNANDEZ, A. **A Review of Additive Manufacturing**. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Miami, Coral Gables, FL 33146, USA, 2012.
- [64] ZAVOROTNITSIENKO, Demetris. **PDMS Preparation**. 2013. Disponível em: <<http://www.ilios3d.com/en/iliosdocumentationpage/3912pdmspreparation>> Acesso em: 18 mai. 2018.
- [65] ZHANG, J. et al. **Effect of the cohesive law shape on the modelling of adhesive joints bonded with brittle and ductile adhesives**. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018.
- [66] ZHOU, J. G., HERSCOVICI, D., CHEN, C. C. **Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000.

